

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

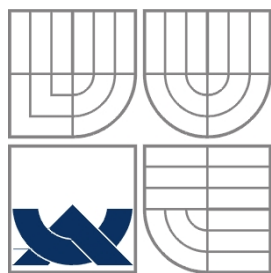
MĚŘENÍ TEPLoty NA ELEKTRICKÉM MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

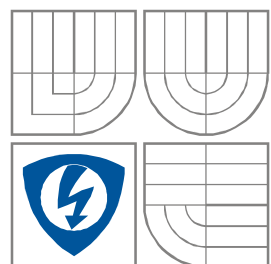
Zbyněk Trnka

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

MĚŘENÍ TEPLOTY NA ELEKTRICKÉM MOTORU

HEAT MEASUREMENT OF ELECTRIC MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zbyněk Trnka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Trnka Zbyněk

Ročník: 3

ID: 98686

Akademický rok: 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Měření teploty na elektrickém motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pro zvolený typ elektrického motoru navrhnete několik metod měření teploty.
2. Provedte měření teploty na povrchu a uvnitř elektrického stroje zvolenými metodami.
3. Vyhodnoťte a porovnejte výsledky jednotlivých metod. Shrňte rozdíly mezi teoretickými předpoklady a skutečnými hodnotami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 29.05.2009

Vedoucí projektu: Ing. Marcel Janda

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s různými metodami měření teploty na elektrickém motoru při užití chlazení. Úvod práce je věnován základním pojmům a definicím z oblasti přenosu tepla, proudění tekutin, ztrátám a následnému odvodu tepla z motoru. Poté je dále věnována pozornost zejména dotykovému měření pomocí termoelektrických článků a bezkontaktnímu měření teploty. Nakonec se práce zabývá analýzou ztrát, odvodem tepla a měřením teplot na asynchronním stroji.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis was to familiarize with various methods of measurement of the temperature of electrical machines with cooling. The introduction of this work is dedicated to basic terms and definitions from spheres of advection, circulation, losses and heat removal from electric machine. The attention is especially devoted to contact measurement by means of thermocouples and next the measurement of temperature without contact. Finally, the work goes into analysis of losses, heat removal and measurement of the temperature of asynchronous machine.

Klíčová slova

Asynchronní stroj; bezkontaktní teploměr; chlazení; měření teplot; proudění; teplo; teplota; termočlánek;

Keywords

Asynchronous machine; non-contact thermometer; cooling; temperature measurement; circulation; heat; temperature; thermocouple;

Bibliografická citace

TRNKA, Z. Měření teplot na elektrickém motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2009. 54s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření teploty na elektrickém motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

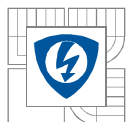
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Marcelu Jandovi** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

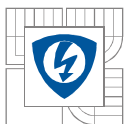
V Brně dne

Podpis autora

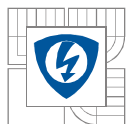


OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. ZÁKLADNÍ POJMY, VZTAHY A DEFINICE.....	12
2.1 TEPLOTA, TEPLA, KAPACITA	12
2.2 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA	13
2.2.1 PŘENOS TEPLA VEDENÍM (KONDUKČÍ)	13
2.2.2 PŘENOS TEPLA VYZAŘOVÁNÍM (SÁLÁNÍM)	14
2.2.3 PŘENOS TEPLA VOLNÝM PROUDĚNÍM (PŘIROZENOU KONVEKČÍ)	14
2.2.4 SÁLÁNÍ A PŘIROZENÁ KONVEKCE	15
2.2.5 UMĚLÁ KONVEKCE.....	15
2.3 PROUDĚNÍ TEKUTIN.....	16
2.3.1 BERNOULLIOVA VĚTA	16
2.3.2 TYPY PROUDĚNÍ V KANÁLE.....	17
2.4 CHLAZENÍ	19
2.4.1 NÁROKY NA CHLADÍCÍ MÉDIA.....	20
2.4.2 CHLADÍCÍ MÉDIA	20
2.5 VENTILÁTORY	21
2.5.1 RADIÁLNÍ	21
2.5.2 AXIÁLNÍ.....	22
2.6 KVADRATICKÝ ATKINSONŮV ZÁKON.....	23
2.7 ZTRÁTY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....	24
3. ČIDLA A PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ TEPLOT	26
3.1 DOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	26
3.1.1 TERMoeLEKTRICKÉ ČLÁNKY	26
3.2 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLot	29
3.2.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY A PRINCIPY	29
3.2.2 SENZORY PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	30
3.2.3 TERMovIZNÍ SYSTÉMY	31
4 TEPLotNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	32
4.1 ZTRÁTY A OTEPLENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE	32
4.1.1 ROZDĚLENÍ ZTRÁT V ASYNCHRONNÍM STROJI	32
4.1.2 OTEPLENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	34
4.2 ODVOD TEPLA Z ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	35
4.2.1 KANÁLY V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH.....	35
4.2.2 VNĚJŠÍ CHLADÍCÍ OKRUH UZAVŘENÝCH ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	37
4.2.3 VÍKA ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	38
5 MĚŘENÍ	40
5.1 ZMĚŘENÉ HODNOTY A GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI	41
5.1.1 MĚŘENÍ Č.1: OTEPLENÍ ZATÍŽENÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE BEZ VNĚJŠÍHO DOPLŇUJÍCÍHO CHLADÍCÍHO OKRUHU.....	41

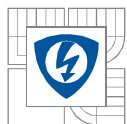


5.1.2	MĚŘENÍ Č.2: OTEPLENÍ ZATÍŽENÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE S VNĚJŠÍM DOPLŇUJÍCÍM CHLADÍCÍM VENTILÁTOREM V OSE HŘÍDELE	43
5.1.3	MĚŘENÍ Č.3: OTEPLENÍ ZATÍŽENÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE S DOPLŇUJÍCÍM VNĚJŠÍM CHLADÍCÍM VENTILÁTOREM POSTAVENÝM KOLMO K OSE HŘÍDELE	45
5.2	MĚŘENÍ OTEPLENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU POMOCÍ TERMOKAMERY K MĚŘENÍ Č.1.....	47
5.3	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH OTEPLENÍ	50
6	ZÁVĚR.....	52
	LITERATURA	54



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1: Herschelův objev tepelného záření</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2.1: Typy proudění.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2.2: Typy ventilace.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2.3: Radiální ventilátor.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2.4: Axiální ventilátor.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2.5: Charakteristiky provozních stavů strojů.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3.1: Zapojení termočlánku.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3.2: Statické charakteristiky některých termočlánků.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3.3: Zapojení termočlánku.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 3.4: Simulace absolutně černého tělesa pomocí izotermické dutiny</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4.1: Tok výkonu asynchronního motoru</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4.2: Tok vzduchovou mezerou a statorovou větví.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 4.3: Radiální ventilační kanály v rotoru.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 4.4: Přejed toku z radiálního kanálu v rotoru do radiálního kanálu ve statoru.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 4.5: Vnější chladicí okruh zavřených strojů</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 4.6: Úpravy kostry strojů.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 4.7: Vstupní a výstupní víka.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 4.8: Zvonové víko.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 5.1: Schéma zapojení.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 5.2: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=5\text{min}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.3: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=5\text{min}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.4: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=15\text{min}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.5: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=15\text{min}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.6: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=25\text{min}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.7: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=25\text{min}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.8: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=35\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.9: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=35\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.10: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=45\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.11: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=45\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.12: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=55\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.13: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=55\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.14: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=65\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.15: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=65\text{min}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.16: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=70\text{min}$.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 5.17: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=70\text{min}$.....</i>	<i>49</i>



Seznam tabulek

<i>Tabulka č.5.1: Hodnoty z měření č.1: Oteplení zatíženého asynchronního stroje bez vnější nezávislé ventilace.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka č.5.2: Změřené hodnoty zatíženého motoru k měření č.1.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka č.5.3: Změřené hodnoty ventilátoru anemometrem k měření č.1.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka č.5.4: Hodnoty z měření č.3: Oteplení zatíženého asynchronního stroje s vnější nezávislou ventilací.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka č.5.5: Změřené hodnoty zatíženého motoru k měření č.2.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka č.5.6: Změřené hodnoty ventilátorů anemometrem k měření č.2.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka č.5.5: Hodnoty z měření č.3: Oteplení zatíženého asynchronního stroje s vnější nezávislou ventilací.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka č.5.8: Změřené hodnoty zatíženého motoru k měření č.3.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka č.5.9: Změřené hodnoty ventilátorů anemometrem k měření č.3.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka č.5.10: Použité přístroje.....</i>	<i>51</i>

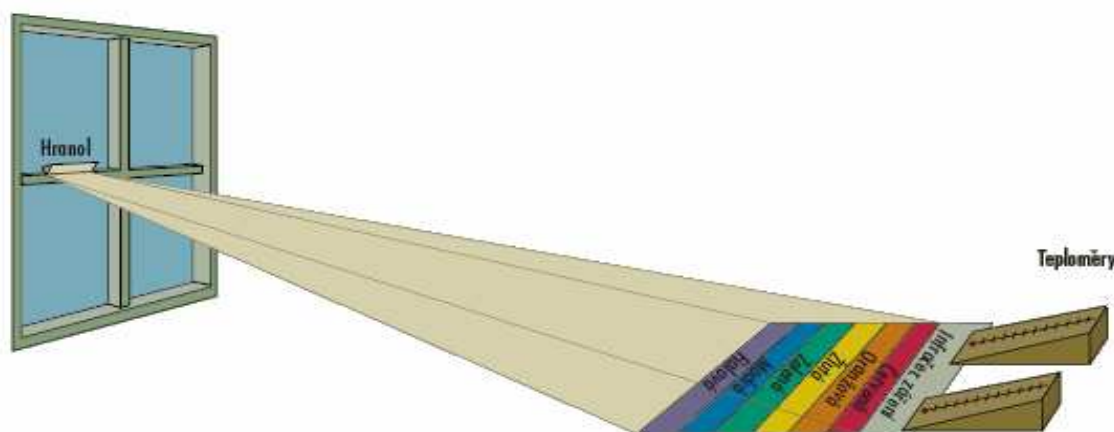
1. ÚVOD

Teplo a teplota sehrává v našich životech velmi významnou roli. Ať už si to uvědomujeme, nebo ne, nachází se všude kolem nás. Vždyť díky teplu, které k nám na naši Zem proudí ze Slunce, mohl na naší planetě vzniknout život a vyvíjet se až do nynější podoby. Jakákoliv látka, živá či neživá, si neustále mezi sebou, či se svým okolím vyměňuje teplo. Tato výměna je realizována elektromagnetickým zářením.

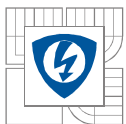
Za to, že v dnešní době jsme schopni převést míru přenosu tepelné energie na nám velmi dobře známou fyzikální veličinu teplo, jsme vděční mnoha vědcům jako byli Sir Isaac Newton, James Clarck Maxwell, Gustav Robert Kirchhoff a mnoha dalším. Základním objevem se určitě stal teploměr, jehož objevení je připisováno italskému vědci Galileo Galileiovi, který první prototyp vynalezl již v roce 1592. Další vývoj tak mohl pokračovat. Psal se rok 1724, když Daniel Fahrenheit zhotovuje rtuťový teploměr spolu s první stupnicí a roku 1724 Anders Celsius, švédský vědec, přichází s Celsiovou stupnicí. A v roce 1848 je Světu konečně představena termodynamická (Kelvinova) stupnice, jenž byla zavedena lordem Williamem Kelvinem z Velké Británie. Lékařský teploměr, tak jak ho známe dnes, byl sestrojen na konci 19. století.

V 18. století Frederick William Herschel objevil pomocí rozkladu světla optickým hranolem neviditelné infračervené tepelné vlny. Na toto zjištění navázali další vědci jako Max Planck, či Albert Einstein. To vše vedlo po letech výzkumů k poznatkům, že tělesa vyzařují tepelné (infračervené) záření. Tak byl položen základ pro měření teploty bezdotykově.

Dnes v 21. století jsme schopni teplotu měřit dotykově pomocí teplotních čidel a taktéž bezdotykově pyrometry, termovizemi a dalšími speciálními přístroji. Veškeré metody a přístroje k nim určené našly uplatnění v různých průmyslových odvětvích jako je energetický, strojný, sklářský, textilní, či potravinářský průmysl... Při konstrukci či revizi elektrických strojů je měření jejich teplot a oteplení věnována patřičná pozornost, kvůli správné činnosti, bezpečnosti a spolehlivosti strojů. Využívají se různé metody k přesnému určení hledaných hodnot. Tato práce se jimi dále zabývá.....



Obrázek 1.1:Herschelův objev tepelného záření [4]



2. ZÁKLADNÍ POJMY, VZTAHY A DEFINICE

2.1 Teplota, teplo, kapacita

Teplota je jednou z nejpodstatnějších veličin vůbec. Je to stavová veličina, jenž popisuje termodynamickou rovnováhu, přesněji řečeno popisuje její stav. Tím je myšlen stav, kdy nedochází v dané izolované soustavě k makroskopickým změnám. Je určena velikostí kinetické energie částic dané hmoty.

Teplota se nesmí zaměňovat s teplem, jelikož teplo není stavová veličina, nýbrž nám popisuje změnu stavu daného tělesa. Měří se nepřímou, což znamená, že ji měříme pomocí ostatních fyzikálních veličin. Teplota a teplotní stupnice je odvozována na základě Carnotova cyklu. Dle Carnotovy věty je účinnost vratných Carnotových cyklů probíhajících mezi dvěma lázněmi nezávislá na látkovém typu daných lázní, nýbrž závisí jen na teplotách těchto lázní. Když $T_T > T_S$ platí

$$\eta = \frac{Q_T - Q_S}{Q_T} = \frac{T_T - T_S}{T_T}, \quad [-; J; K] \quad (2.1)$$

ze vztahu (1) plyne (2)

$$\frac{T_T}{T_S} = \frac{Q_T}{Q_S}. \quad [K; J] \quad (2.2)$$

Kde

η je účinnost cyklu,

Q_T ...teplo odebrané látkou z lázně o teplotě T_T ,

Q_S ...teplo odebrané látkou z lázně o teplotě T_S .

Základními jednotkami jsou Kelvin [K] a stupeň Celsia [°C]. Kelvin byl stanoven pomocí rovnovážného stavu tří skupenství vody tzv. trojného bodu vody, jenž je přesně určen na $T=273,16\text{K} \equiv 0,01^\circ\text{C}$. Celsiovu teplotu vypočteme pomocí vztahu

$$t = T (^{\circ}\text{K}) - 273,15\text{K}. \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.3)$$

Ze vztahu (2.3) plyne přepočítání na kelvinovy stupně

$$T = t (^{\circ}\text{C}) + 273,15\text{K}. \quad [\text{K}] \quad (2.4)$$

Pro teplotní rozdíl daných dvou stupnic platí

$$\Delta t = \Delta T. \quad [^{\circ}\text{C}; \text{K}] \quad (2.5)$$



Nejnižší teplota je teplota absolutní nuly ($-273,15^{\circ}\text{C}$; 0°K), při této teplotě ustává v látce jakýkoliv pohyb. Zatím není známa nejvyšší teplota. Další stupnice je Fahrenheitova teplotní stupnice, jenž se používá např. v USA nebo ve Velké Británii.

Pod teplem si tedy můžeme představit tepelnou energii, kterou má látka o určité hmotnosti m [kg] a určité teplotě t [$^{\circ}\text{C}$] od počátku soustavy. Při kladné teplotě je tepelná kapacita kladná, zatímco při záporné je záporná a při nulové teplotě je kapacita nulová. Uvažujeme-li Kelvinovu stupnici, je tepelná kapacita pouze kladná.

V praxi nám tepelná kapacita říká, kolik je třeba dodat tepla, aby se daná látka ohřála o jeden stupeň $^{\circ}\text{C}$. Pro tepelnou kapacitu platí

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{K}}; \text{J}, \text{K} \right] \quad (2.6)$$

Kde Cje tepelná kapacita,
 Q ...teplo dodané, či odebrané tělesu,
 ΔT ...rozdíl teplot mezi počátečním a koncovým stavem.

Z tepelné kapacity se definuje měrná tepelná kapacita, jenž je typická pro každou látku. Pomocí ní se definuje, jak je daná látka schopna hromadit teplo. Říká nám vlastně, kolik je třeba dodat tepla, aby se daná látka o hmotnosti 1kg ohřála o jeden stupeň $^{\circ}\text{K}$. Pro měrnou tepelnou kapacitu platí

$$c = \frac{C}{m}. \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{K.kg}}; \frac{\text{J}}{\text{K}}, \text{kg} \right] \quad (2.7)$$

Kde cje měrná tepelná kapacita,
 Q ...tepelná kapacita,
 ΔT ...hmotnost dané látky.

2.2 Způsoby přenosu tepla

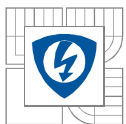
Přenosu tepla dochází trojím způsobem: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a vyzařováním (sáláním).

2.2.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Tento jev se vyskytuje ve všech skupenstvích, ale především v tuhých materiálech. Tyč určité délky l a průřezu s je po celém svém obvodu tepelně izolovaná. Jsou-li na jejích koncích rozdílné teploty T_1, T_2 , lze pro tepelný tok neboli výkon, který jí prochází napsat

$$q = \frac{(T_1 - T_2)\lambda s}{l}. \quad \left[\text{W}; \text{K}, \frac{\text{W}}{\text{m.K}}, \text{m}^2, \text{m} \right] \quad (2.8)$$

Kde q je tepelný tok,
 λ je měrná tepelná vodivost,
 T_1, T_2 teploty na koncích tyče,
 s průřez tyče a
 l délka tyče.



Pro určení tepelné vodivosti určitého materiálu se obvykle používá ekvivalentu elektrického odporu, který zde nazýváme tepelný odpor. Jak je vidět v následující rovnici, je tepelný odpor definován jako převrácená hodnota předešlého součinu

$$r = \frac{l}{\lambda s} \cdot \left[\frac{K}{W}; m, \frac{W}{K \cdot m}, m^2 \right] \quad (2.9)$$

Kde r je tepelný odpor,
 l je délka tyče,
 λ je měrná tepelná vodivost a
 s průřez tyče.

2.2.2 Přenos tepla vyzařováním (sáláním)

Děje se tak formou elektromagnetického záření. Energie se po dopadu na těleso mění na teplo. Pro představu, plocha o rozměru A a teplotě T , okolí je vzdálené a má teplotu T_{ul} , jenž je menší než okolní teplota. Těleso poté do okolí vyzařuje tepelný výkon

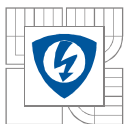
$$P = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot E \cdot A (T^4 - T_{ul}^4) \cdot \left[W; \frac{W}{m^2 K^4}, -, m^2, K \right] \quad (2.10)$$

Kde P je tepelný tok vyzařovaný do okolí,
 $5,67 \cdot 10^{-8}$ je Stefan-Boltzmannova konstanta,
 E je emisivity,
 A je plocha a
 T, T_{ul} teplota tělesa a teplota okolí.

Tento vztah lze například aplikovat na stroj, volně stojící, bez blízkých stěn s vynecháním podlahy.

2.2.3 Přenos tepla volným prouděním (přirozenou konvekcí)

Tento děj se vyskytuje především při přenosu tepla v kapalinách a plynech. Je to tepelný přestup, mezi povrchem pevného tělesa a obklopujícím médiem. Oteplované médium se pohybuje samovolně díky rozdílné hustotě směrem vzhůru. Ne jako u umělé konvekce, kde je hnáno ventilátorem, či jiným přístrojem podél tělesa, kde dochází k přestupu tepla. Například po doběhnutí stroje, dochází k tomuto jevu, kdy ohřátý vzduch jde ze stroje vzhůru ven.



„Tepelný tok q , který za časovou jednotku projde mezi plochou povrchu ponořeného tělesa S a obklopujícím prostředím, při rozdílu teplot ΔT je :“ [12]

$$q = (T_1 - T_{ul}) S \alpha_{ul} \cdot \left[W, K, m^2, \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.11)$$

Kde q je vystupující tepelný tok,
 T_1 je teplota tělesa (větší teplota),
 T_{ul} teplota okolí,
 S plocha přestupu a
 α_{ul} je součinitel přestupu tepla okolím

U přirozené konvekce dochází obvykle k laminárnímu proudění. Někdy se vyskytuje i proudění turbulentní, ale to jen díky vyšším teplotám, nebo když se nachází ve vyšších partiích tělesa.

2.2.4 Sálání a přirozená konvekce

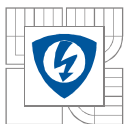
Předchozí oddělené řešení v praxi vůbec nenastává, až na speciální měření (např. ve vakuu) probíhají oba děje v technické praxi současně, ač jsou značně odlišné. Jako například po doběhnutí stroje, kdy je jeho ochlazování povrchu realizováno těmito dvěma jevy současně, a zajisté se tak děje i při chodu stroje. Dále se tyto jevy vyskytují u uzavřených strojů bez ventilace, kde vlastně představují jedinou možnost jak daný stroj chladit. Při výpočtech u elektrických strojů lze odvod tepla sáláním a konvekcí uskutečnit spojením dvou předchozích odstavců. Přitom se zavádí různá zjednodušení, jako že okolí má stejnou teplotu jako vzduch v blízkosti stroje, a že stěny chlazené volným prouděním mají stejnou teplotu jako stěny sálající.

2.2.5 Umělá konvekce

Při umělém proudění je médium udáváno do pohybu tlakovým zdrojem, tak aby překonávalo odpory v kanálech, a tím byla zaručena tepelná výměna. Tok média u tohoto děje může být v oboru laminárním, turbulentním nebo přechodným. U elektrických strojů se přestup tepla prouděním v laminárním oboru vyskytuje jen zřídka a v oboru přechodovém je ovlivněn řadou různých činitelů jako je například chvění. Nejčastěji se v elektrických strojích při umělé konvekci vyskytuje proudění turbulentní.

Při návrhu stroje, kdy se bere v potaz přestup tepla a odpor proudění se všeobecně používá těchto zásad:

- Zvýšený odpor proudění má za následek lepší odvod tepla.
- V úsecích, kde se teplo odvádí, je účelné zvýšit odpor. Zatímco v úsecích, které teplo neodvádí (neaktivních), naopak pokud možno snížit.
- Je záhodno, aby místa kde se odvádí teplo měla optimální rozměry.



2.3 Proudění tekutin

Jak je všeobecně známo, pod pojem tekutiny patří kapaliny a plyny. Proudění tekutin je všeobecně rozsáhlá a důležitá část v technické fyzice. Proto jsou v následujícím textu uvedeny jen nejzákladnější poznatky a vztahy o ustáleném proudění nestlačitelných tekutin. Pro hlubší studium nutno vyhledat odbornější literaturu.

2.3.1 Bernoulliova věta

Teče-li plynový nebo kapalinový proud jedním směrem se stálou rychlostí, rozeznáváme u něj dva tlaky: statický a dynamický. Což je vlastně obdoba potenciální a kinetické energie v objemové hustotě proudící kapaliny.

Tlak statický by byl naměřen přístrojem, jenž by se pohyboval v proudu. Vztahuje se k atmosférickému tlaku a je rozeznáván jako přetlak nebo podtlak. Dynamický tlak je ekvivalentem kinetické energie hmoty. Toto nám dává nejzákladnější Bernoulliovu větu [11]

$$p_s + p_d = konst, \quad \left[\frac{kp}{m^2} \right] \quad (2.12)$$

kde p_s je tlak statický a
 p_d je dynamický tlak.

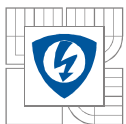
Přitom objemový tok proudící látky je stálý

$$Q = vS = konst. \quad \left[\frac{m^3}{s}; \frac{m}{s}, m^2 \right] \quad (2.13)$$

Kde Q je objemový tok,
 v je rychlost toku,
 S průřez, jenž je kolmý na vektor rychlosti.

Poněvadž se rychlost mění s průřezem kanálu, můžeme nejjednodušeji aplikovat danou větu takto: Máme-li kanál určitého průřezu, a v něm proudění o jisté rychlosti, tak rozšířením tohoto kanálu nám sice klesne rychlost, ale tlak v tomto rozšířeném kanálu stoupne.

Je zřejmé, že při proudění vznikají ztráty. Tyto ztráty energie jsou zapříčiněny třením na stěnách, utvářením vírů v proudění, každou náhlou změnou průřezu a změnou toku, turbulencí, drsností stěn atd. Aby se ztrátami proudění nezastavilo, je nutno tyto ztráty krýt tlakovým zdrojem. Pro shrnutí tedy, tlakové poklesy, spády a úbytky jsou vlastně ztráty energie proudění a to jak kinetické tak potenciální a značí se Δp . Bernoulliova věta se tedy doplňuje vztahem pro ztráty a tím se přizpůsobuje lépe skutečnosti.



$$p_{s1} + p_{d1} = p_{s2} + p_{d2} + H, \quad \left[\frac{kp}{m^2} \right] \quad (2.14)$$

$$H = \sum \Delta p. \quad \left[\frac{kp}{m^2} \right] \quad (2.15)$$

Kde H je vyvolaný tlak zdrojem a
 Δp ztráty vznikající při proudění.

Tlakový zdroj mění mechanickou energii na energii toku a jednotlivé druhy tlakového zdroje budou probírány posléze.

2.3.2 Typy proudění v kanále

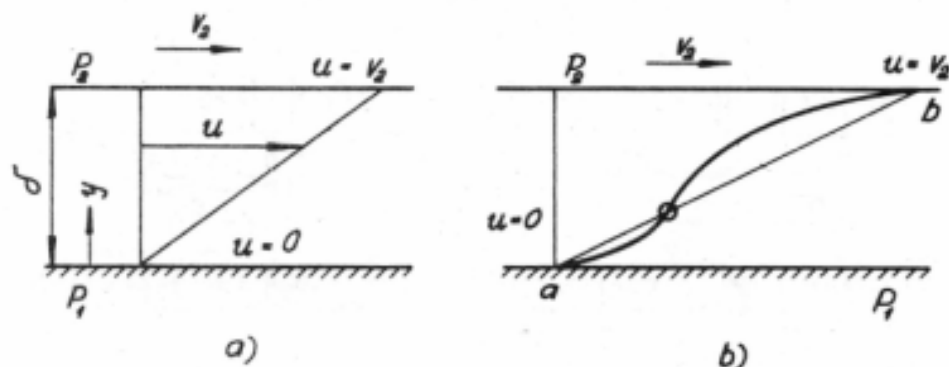
Rozeznáváme dva základní typy proudění: laminární a turbulentní. To zda se v kanále bude vyskytovat proudění turbulentní, nebo laminární závisí na mnoha faktorech jako je rychlost, viskozita a hustota tekutiny. Dále také na tvaru a drsnosti daného kanálu. Většinu těchto faktorů v sobě zahrnuje Reynoldsovo číslo, jenž je víceméně směrodatné pro charakter proudění.

Viskozita

Je to vlastně vnitřní tření tekutiny. Tato vlastnost udává poměr mezi změnou rychlosti a tečným napětím mezi sousedními vrstvami při proudění kapaliny. Značí se ν . Větší viskozita kapaliny znamená tedy větší odpor při proudění. Je zřejmé, že viskozita ideální kapaliny je rovna nule. Máme-li dvě paralelní desky o určité mezeře δ , jenž je vyplněná tekutinou, tak při pohybu jedné desky bude kapalina strhována po vrstvách. Při menší rychlosti desky, bude rychlost těchto vrstev růst lineárně od 0 (deska v klidu) až po ν_2 (rychlost pohybující se desky). Toto je charakteristické pro proudění laminární (obrázek: 2.1a)). Vzroste-li rychlost desky ν_2 nad určitou mez, mění se rozložení rychlostí jednotlivých vrstev. Vrstvy blízko stěn mají určitou rychlost u , která je větší než rychlost vrstev uprostřed desek. Tím je charakterizováno proudění turbulentní (obrázek: 2.1b)). Pro viskozitu (absolutní nebo dynamickou) můžeme poté psát

$$\nu = \frac{\tau \delta}{\nu_2}. \quad \left[\frac{Ns}{m^2}; \frac{N}{m^2}, m, \frac{m}{s} \right] \quad (2.16)$$

Kde ν je viskozita,
 τ je tečné napětí,
 δ mezera mezi deskami a
 ν_2 rychlost pohybující se desky.



Obrázek 2.1: Typy proudění a) laminární proudění (mírná rychlost v_2), b) turbulentní proudění (větší rychlost v_2) [5]

Reynoldsovo číslo.

Mnohačetnými pokusy bylo objeveno, že pro charakter proudění je směrodatné bezrozměrové Reynoldsovo číslo

$$\text{Re} = \frac{vD}{\nu} \quad \left[-; \frac{m}{s}, m, \frac{Ns}{m^2} \right] \quad (2.17)$$

Kde Re je Reynoldsovo číslo,
 v je rychlost tekutiny,
 D průměr kanálu,
 ν je její viskozita.

Laboratorně bylo zjištěno, že přechod mezi výše zmiňovanými prouděními je pro $\text{Re}=2000$.

Laminární proudění

Jak již bylo řečeno, toto proudění nastává přibližně do Reynoldsova čísla 2000. Maximální rychlost tohoto proudění je v ose kanálu a zmenšuje se směrem ke stěnám. Rychlostní profil je parabola. V každém průřezu se vyskytují soustředné kružnice, což sou vlastně isotachy (křivky stejných rychlostí). Tlakový spád stoupá úměrně v kruhovém kanále s rychlostí kapaliny. V elektrických strojích se laminární proudění většinou nevyskytuje, navíc odvod tepla pomocí něj je nižší než u turbulentního proudění.

Turbulentní proudění

Platí pro $\text{Re} > 2000$. Nastává tedy při vyšších rychlostech. Jeho charakter má také tvar paraboly, s tím rozdílem, že rychlost se u středu více vyrovnává. Jednotlivé vrstvy tekutiny neklouzají klidně, nýbrž tvoří turbulony (makroskopické shluky molekul). Ke vzniku tohoto typu proudění přispívají vlivy jako například chvění. Přestup tepla, jak již bylo uvedeno, je mnohem vyšší u tohoto typu proudění, proto je žádáno v elektrických strojích.

Přechodný obor

Jelikož hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním byla určena v laboratorních podmínkách na hladkých kruhových kanálech, v praxi se přechod mezi těmito prouděními udává v rozmezí od 1800 do 4000. Například turbulentní proudění v elektrických strojích, při vlivech které mu přispívají (drsnoty stěn, chvění...), může nastat už u $Re=1000$.

2.4 Chlazení

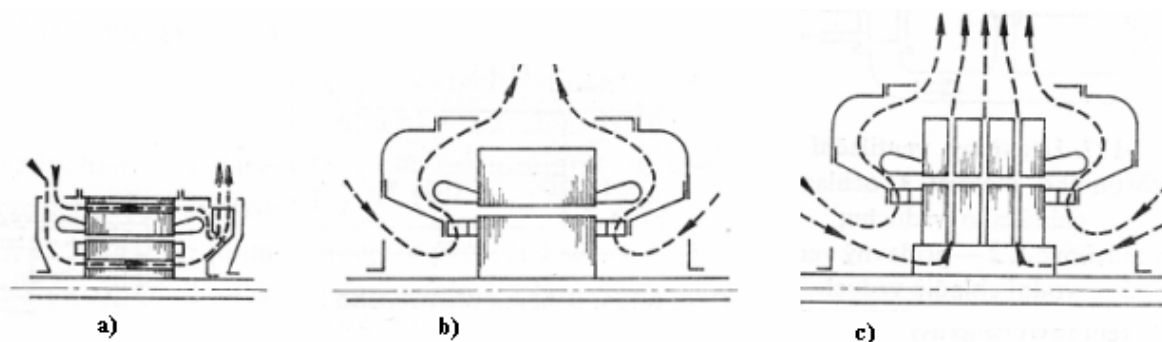
Chlazení elektrického stroje vlastně znamená odvod tepla, které se ve stroji tvoří vlivem ztrát. Dané teplo odvádíme ze stroje chladicí tekutinou, což je látka, která má za úkol chladit stroj. Jako chladicího média je možné použít plynu (např. vzduch, vodík) nebo kapalin (nejčastěji voda).

V elektrických strojích rozeznáváme tři základní typy ventilace dle směru chladicího média. Je to axiální ventilace (obrázek:2.22 a)), dále radiální ventilace (obrázek:2.22 b)) a axiálně - radiální ventilace (obrázek:2.22 c)). Dále můžeme rozeznávat otevřený a uzavřený oběh chladiva. U otevřeného oběhu se médium neustále obnovuje. Bere se tedy z okolního prostředí, a poté se mu odevzdává. Uzavřený oběh se vyznačuje tím, že chladivo primární odevzdává své teplo sekundárnímu médiu, čili oběh je zprostředkováván stále stejným chladivem.

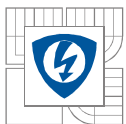
Z hlediska nároku na vlastnosti chladících médií je důležité dělení chlazení na přímé a nepřímé. U přímého chlazení je chlazený objekt vystaven přímo chladicímu médiu, zatímco u nepřímého je tento styk zprostředkován (např. mezistěnou, izolací vodičů). Je zřejmé, že u nepřímého chlazení jsou menší nároky na vlastnosti média, než u přímého chlazení.

Velice důležitý je také zdroj energie pro ventilátor, či jiný přístroj zajišťující tok chladiva. Zdroj může být závislý, nebo nezávislý. Nezávislý zdroj získává energii pro oběh chladiva ze zdroje nezávislého na daném elektrickém přístroji, zatímco závislý zdroj je poháněn energií z chlazeného stroje. Jde třeba o případ, kdy je ventilátor umístěn na hřídeli chlazeného stroje. V některých případech je proudění chladicího vzduchu zajištěno rozdílem teplot uvnitř stroje, či otáčením rotoru. Jde o takzvané přirozené chlazení a daný stroj nepotřebuje ventilátor.

Chlazení se označuje velkými písmeny IC (z anglického International Cooling), dále je pomocí třetího velkého písmena vytyčen typ média. Poté následuje, dvojčíslí udávající způsob oběhu média a zdroj energie zajišťující oběh. Například označení IC A 01, nám říká že chladicí médium je vzduch, chladicí oběh je otevřený a se závislým zdrojem pro jeho oběh.



Obrázek 2.2:a) axiální ventilace, b) radiální ventilace, c) axiálně radiální – ventilace [5]



2.4.1 Nároky na chladicí média

U chladících kapalin, které jsou v přímém styku s chlazenými částmi, je záhodno, aby měly dobré elektrické vlastnosti, čili vysoký izolační odpor a elektrickou pevnost, a aby jejich dielektrické ztráty nebyly velké. Z tepelných vlastností je nejdůležitější malá viskozita a povrchové napětí. Dále by tyto kapaliny neměly reagovat jakkoliv s povrchem kovů (slučování, rozpouštění atd.), měly by tedy být chemicky a fyzikálně netečné. Dále se požaduje nehořlavost, nízká teplota tání a nejedovatost.

U kapalin v nepřímém kontaktu, jak již bylo zmíněno, jsou nároky menší. Hlavní je aby byly chemicky a fyzikálně netečné, a aby měly dobré tepelné vlastnosti, čili malé povrchové napětí a viskozitu.

Povrchové napětí

Je to děj, kdy se kapalina snaží dosáhnout co nejmenší plochy při určitém objemu. V praxi to znamená, že se tekutina zakulacuje a usiluje tím dospět ke stavu o co nejmenší energii. Dá se říci, že čím větší má kapalina povrchové napětí, tím více se zakulacuje. To vše se děje v důsledku interakce molekul povrchové vrstvy. Pro potřebu chlazení jsou nejvýhodnější kapaliny, s co nejmenší hodnotou povrchového napětí, jelikož lépe vyplní chladicí prostor.

Elektrická pevnost

Zvyšujeme-li při namáhání izolantů napětí, dosáhne intenzita pole jisté hodnoty, kdy dojde u tekutých izolantů k přeskoku a u pevných izolantů k průrazu. Tato intenzita je vlastně elektrická pevnost, značí se E_p . Popisuje specifický parametr elektroizolačních látek pro jejich použití v praxi. Je dána vztahem

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad \left[\frac{V}{m}; V, m \right] \quad (2.18)$$

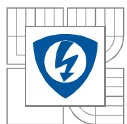
kde E_p je elektrická pevnost,
 U_p je průrazné napětí a
 d tloušťka izolantu v místě přeskoku, či průrazu.

2.4.2 Chladicí média

Jak již bylo řečeno, chladicí médium je látka, která má za úkol chladit stroj. Mezi základní chladicí tekutiny, které se používají v elektrických strojích patří vzduch, vodík, voda a silikonový olej. Jako primární chladivo se označuje chladivo, jenž odvádí teplo zevnitř stroje, zatímco sekundární chladivo odvádí teplo z kostry nebo z chladiče stroje.

Vzduch

Používá se velice často u elektrických strojů. Ventilátor, nejčastěji umístěný na hřídeli, vhání lopatkami vzduch přímo do motoru. Při otevřené ventilaci dochází k zanášení částí ventilačních kanálů v motoru, což může vést ke zvětšení oteplení vinutí a železa stroje a zmenšení životnosti stroje, proto se používá k čištění vzduchu různých filtrů (olejových atd.). Dále je nutno brát v potaz při otevřené ventilaci neustálý přísun kyslíku do stroje, což může



vést ke vzniku požáru po průrazu izolace a vzniku obloukového výboje. Tyto nedostatky můžeme odstranit ventilací se zavřeným oběhem paliva.

Vodík

Používá se směs, která je složena z 97% vodíku a 3% vzduchu. Tato směs má nižší hustotu asi 10krát než vzduch, což nám snižuje ventilační ztráty. Zvýšíme-li tlak vodíku, snižuje se jeho oteplení a teplotní spády mezi plynem a tělesem. Díky tomu se snižuje tepelné zatížení stroje a stroj může být menší. Mezi nevýhodu patří, že se neustále musí kontrolovat čistota vodíku, neboť při větší koncentraci se vzduchem tvoří výbušnou směs.

Voda

Je nehořlavá a nejedovatá. Mezi její nevýhody patří malá elektrická pevnost a reakce s různými látkami (koroze). Dále taky to, že při 0°C zamrzá. Používá se výhradně destilovaná voda. Zabraňuje se tak zanášení vodních kanálů nánosy solí.

Silikonové oleje

Jsou chemicky i tepelně stabilní. Mezi jejich přednosti patří dlouhá životnost. Jeho viskozita se změnou teploty mění málo. Velice často se používá pro chlazení velkých transformátorů.

2.5 Ventilátory

Ventilátory průmyslové se liší od ventilátorů v elektrických strojích velmi značně. Jenom zcela základní fyzikální zákony platí pro oba typy ventilátorů. Účinnosti průmyslových ventilátorů jsou okolo 90%, zatímco malé ventilátory v elektrických strojích mají účinnost 10 až 20% a velké přibližně 20 až 50%. Ventilátory dělíme dle [11] na:

- a) Radiální – Zprostředkovávají vysoký tlak.
- b) Axiální – Užívají se při nízkých tlacích a velkých objemech vzduchu. Dále se vyznačují menšími ztrátami než radiální ventilátory.
- c) Kombinovaný – Z předchozích dvou ventilátorů.

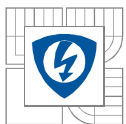
Jak již bylo zmíněno posuzuje se dále zdroj energie pro ventilátor a to tak, že zdroj je závislý, nebo nezávislý.

2.5.1 Radiální

Máme-li libovolný kanál průřezu S a délky $r_2 - r_1$, jenž se otáčí okolo své osy úhlovou rychlostí ω , získáme díky vlivu odstředivé síly rozdíl statických tlaků

$$H_{th} = \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2). \quad \left[\frac{kp}{m^{-2}}, \frac{kg}{m^3}, \frac{m}{s} \right] \quad (2.19)$$

Kde	H_{th}	je rozdíl statických tlaků,
	u_1 a u_2	jsou obvodové rychlosti oběžného kola pro něž platí $u = \omega r$ a
	ρ	je měrná hmotnost tekutiny, která vyplňuje kanál.



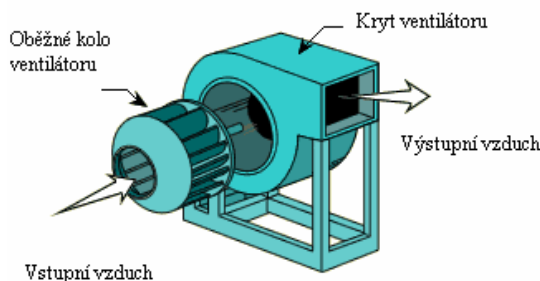
Tento vztah je velice přibližný. Pro přesnější popsání tohoto děje se přistupuje k řadě zjednodušení poměrů na vstupu a výstupu.

Máme-li rotující kanál tvořený dvěma lopatkami a bočními stěnami, můžeme poté v kanále rozeznávat rychlosti proudění absolutní c [ms^{-1}] (vzhledem k okolí) a relativní w [ms^{-1}] (vzhledem k oběžnému kolu). Výše zmíněná obvodová rychlost se značí u [ms^{-1}]. Pro absolutní rychlost toku poté platí vztahy $c_1 = u_1 + w_1$ a $c_2 = u_2 + w_2$.

Tímto se dostaneme k přesnější rovnici, kde se kromě základního tlakového zisku (2.19) uvažují další dvě složky. A sice relativní rychlost tekutiny v kanálu w_2 na výstupu z lopatek. Tato rychlost je menší než relativní rychlost w_1 na vstupu do kanálu, čímž dle Bernoulliho věty dostaneme určitý tlakový zisk. A druhá je absolutní rychlosti tekutiny na výstupu c_2 , které odpovídá dynamický tlak na výstupu, od něhož se odečítá dynamický tlak na vstupu, jak je patrné z třetí části rovnice. Poté je celkový tlakový rozdíl mezi sacím a vytlačným prostorem ventilátoru roven dle [11]

$$H_{th} = \frac{\rho}{2} [(u_2^2 - u_1^2) + (w_2^2 - w_1^2) + (c_2^2 - c_1^2)] = p_s + p_d. \quad (2.20)$$

První dvě složky představují statické tlakové složky. Třetí je dynamická tlaková složka, a ta aby byla platná, se musí usměrnit na tlak statický. To se realizuje pomocí difuzoru, který zmenší výstupní absolutní rychlost. V elektrických strojích se difuzor, nebo zařízení mu podobné většinou nevyskytuje, z důvodů zvětšení objemu a váhy stroje, proto se počítá jen s prvními dvěma složkami a výstupní absolutní rychlost zůstává z velké části nevyužita.

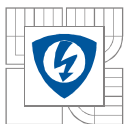


Obrázek č.2.3: Radiální ventilátor [14]
http://en.wikipedia.org/wiki/Axial_fan#Axial_fans

2.5.2 Axiální

Tyto ventilátory lze nejjednodušeji charakterizovat pomocí teorie nosné plochy. V proudu vzduchu w je těleso šířky b a délky l . Kolmo ke směru proudění působí vztlak A , brzdná síla W působí ve směru proudění. Tyto síly je dle [11] možno vyjádřit

$$A = c_z p_d l b, \quad \left[kp, -, \frac{kp}{m^2}, - \right] \quad (2.21)$$



$$W = c_x p_d lb.$$

$$\left[kp, -, \frac{kp}{m^2}, - \right] \quad (2.22)$$

Kde A je vztlak,
 W je brzdná síla,
 c_z je vztakový součinitel,
 c_x je ztrátový součinitel,
 p_d je dynamický tlak a
 lb plocha nosné plochy.

Hodnoty součinitelů a sil W a A závisí na náběžném úhlu α , který svírá spodní strana obtékaného tělesa s proudem vzduchu, a taky na průřezovém tvaru tělesa, nebo chceme-li profilu, či nosné ploše tělesa. Pro axiální ventilátory jsou postačující velmi jednoduché profily, stačí když je nosná plocha alespoň částečně rovinná. Proto se na místo přesně odlitých lopatek velice často používá plechových lopatek vyhnutých do oblouku.



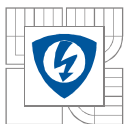
Obrázek č.2.4:Axiální ventilátor [15]

<http://www.kovosluzbaots.cz/och-ventila.htm>

2.6 Kvadratický Atkinsonův zákon

U ventilací jsou zásadní dvě veličiny. První je množství média Q_v , protékajícího okruhem, které je potřebné k odvodu tepla ze stroje. Druhá veličina je tlak H , který musí vytvořit ventilátor pro průchod chladicího média strojem. Poté je možno psát

$$H = Q^2 \sum K. \quad \left[\frac{kp}{m^2}, \frac{m^3}{s}, \frac{kps^2}{m^8}, \right] \quad (2.24)$$



Kde K je aerodynamický odpor protékajícího úseku, jenž se liší pro různé kanály. To jak na rozměrech a tvaru, tak na podmínkách vstupu a výstupu kanálů. Pro odpor můžeme psát

$$K = \frac{\Delta p}{Q^2} \cdot \left[\frac{kp s^2}{m^8}, \frac{kp}{m^2}, \frac{m^3}{s} \right] \quad (2.24)$$

2.7 Ztráty v elektrických strojích

U každého elektrického stroje vznikají při provozu ztráty, ty se dělí podle míst a způsobu vzniku. Tato místa je zajisté nutné chladit, pro správnou činnost daného stroje. Proto je nutné při teplotní analýze uvažovat jak ztráty, tak jejich chlazení. Všeobecně lze ztráty v vznikající v elektrických strojích dělit

1. ΔP_j Elektrické ztráty, jenž se vyskytují ve vodivých částech stroje [W].
2. ΔP_{Fe} Magnetické ztráty, jež vznikají ve feromagnetických dílech, díky střídavému magnetickému poli. Taktéž se nazývají ztráty v železe [W].
3. ΔP_i Dielektrické ztráty, které vznikají díky střídavému elektrickému poli v izolantech [W].
4. ΔP_{mech} Mechanické ztráty, které zahrnují i ztráty ventilační [W].

Celkové ztráty ΔP_C získáme součtem jednotlivých ztrát

$$\Delta P_C = \Sigma \Delta P_n \quad [W] \quad (2.25)$$

Pro účinnost stroje lze poté psát

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \Delta P_C}{P_p} = 1 - \frac{\Delta P_C}{\Delta P_C + P_p} \quad [-] \quad (2.26)$$

Obecně se dá říci, že se zatížením se mění ztráty stroje. S určitou přesností můžeme říct, že první druh ztrát je úměrná čtverci zatěžovacího proudu (ztráty elektrické), další typ ztrát je přímo úměrný tomuto proudu (budící ztráty, ztráty ve sběrném ústrojí způsobené třením) a poslední typ ztrát na tomto proudu nezávisí, pokud se nemění otáčky a napětí stroje (ztráty mechanické, dielektrické a v železe).

Největší ztráty představují ztráty elektrické, přesněji Jouleovy ztráty, ve vodičích, jimiž prochází proud. Teplo způsobené průchodem proudu zůstává částečně ve vodičích, kde způsobuje jejich oteplení a částečně odchází povrchem do okolí. Matematickým řešením tohoto děje obdržíme dle [7] vztah pro okamžitou hodnotu oteplení

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad [K] \quad (2.27)$$

Dále se dá najít vztah pro okamžitou hodnotu ochlazování

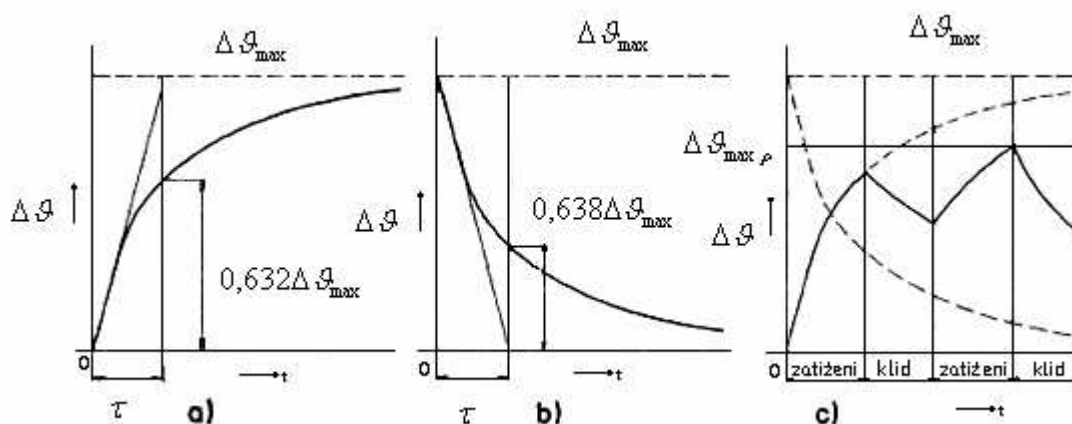
$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad [\text{K}] \quad (2.28)$$

a pro ustálený stav

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta \vartheta_{\max}. \quad \left[\Omega, A; \frac{W}{m^2}, m^2, K \right] \quad (2.29)$$

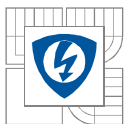
Kde R je odpor vodiče,
 I proud tekoucí vodičem,
 α_0 měrná chladivost jednotky povrchu,
 A povrch vodiče, jímž prochází teplo do okolí.
 $\Delta \vartheta_{\max}$ vyjadřuje ustálené oteplení.
 τ je časová konstanta, jenž udává čas, za jak dlouho by se těleso dostalo do ustáleného oteplení, bez jakéhokoliv odvodu tepla [s].

Grafické vyjádření těchto stavů je na obr. 2.5a) b), Obr. 6.1 c) ukazuje stav kdy se střídá oteplování a ochlazování stroje.



Obrázek 2.5: Charakteristiky provozních stavů strojů: a) oteplování, b) ochlazování, c) přerušovaný stav [7]

Při konstrukci strojů je velmi důležitá hodnota ustáleného oteplení z hlediska volby izolace, jelikož na tom závisí životnost a spolehlivost stroje. Dá se říci, že použitý typ izolace a chlazení určuje velikost jmenovitého proudu.



3. ČIDLA A PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ TEPLOT

Teplotní čidla můžeme nazývat senzory, snímače teploty, a nebo prostě teploměry. Čidla a přístroje jsou vlastně nástroje, které nám umožňují měřit teplotu. Jejich dělení je různé a velice pestré. V potaz se mohou brát různá hlediska. Například konstrukční hledisko, princip podle kterého se měří teplota, jestli se čidla přikládají na měřený objekt, nebo ne, či jak je převáděn měřený signál. Také se mohou dělit podle rozsahů teplot, či podle teploměrné látky. V následujícím textu je použito dělení podle instalace čidla, jenž je jako dělení, nejpřehlednější. Nutno dodat, že zde jsou popsána jen čidla a přístroje pro měření teplot, se kterými jsem v dané práci pracoval.

3.1 Dotykové měření teploty

Čidla tohoto typu jak je patrné z názvu přikládáme na měřený objekt.

3.1.1 Termoelektrické články

Termočlánky se skládají ze dvou různých vodičů, kladné a záporné části. Tyto části vytváří na začátku a na konci dva spoje. První je vodivě spojen a nazývá se měřicí spoj T_M , druhý se nazývá srovnávací spoj T_S . Jestliže termoelektrode na jakémkoliv místě rozpojíme, na daných svorkách vzniká termoelektrické napětí E_{MS} [V], ovšem za předpokladu, že se teploty spojů liší. Vznik termoelektrického napětí je založen na Seebeckově jevu, což je vlastně převod energie tepelné na energii elektrickou.

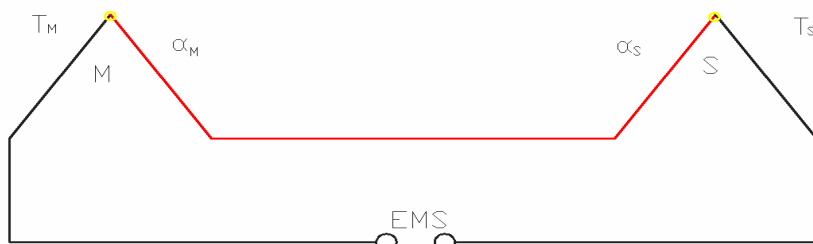
„Tento jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii, a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších.“ [1]

Pro termoelektrické napětí se též používá název elektromotorické napětí, jeho závislost na teplotě (pro malé rozdíly teplot mezi spoji) se často vyjadřuje vztahem

$$E_{MS} = \alpha_M (T_M - T_S) + \alpha_S (T_S - T_M) = \alpha (T_M - T_S), \quad (3.1)$$

kde E_{ms} je termoelektrické napětí [V],
 $\alpha, \alpha_M, \alpha_S$ jsou termoelektrické konstanty [V/K],
 T_M teplota měřicího spoje [K],
 T_S teplota srovnávacího spoje [K].

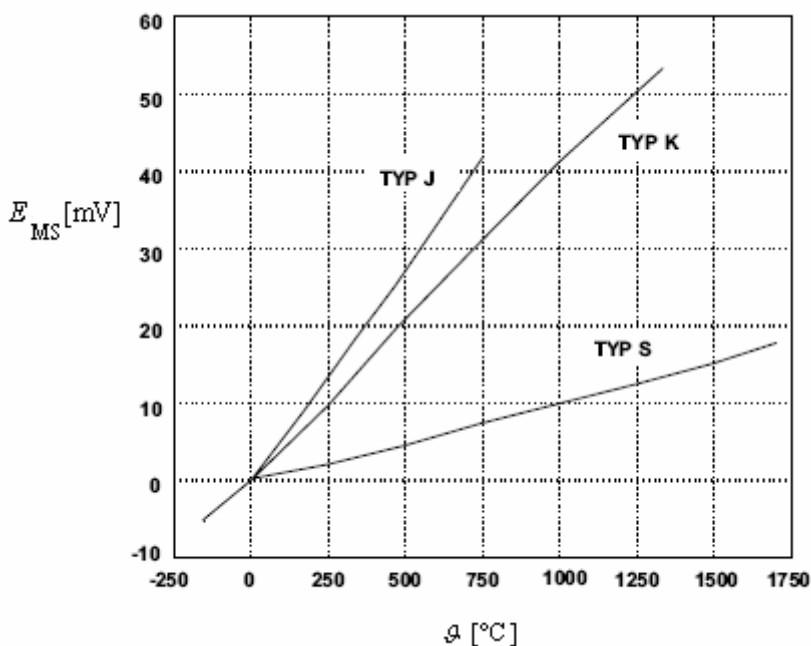
Základní zapojení termočláunku je na obr. č.3.1, kde S je srovnávací spoj, M je měřicí spoj.



Obrázek 3.1: Zapojení termočláunku

Typy termočláunků

Jak již bylo řečeno, termočlánek se skládá ze dvou vodičů různých materiálů. Dané páry pro zhotovení termočláunku jsou normalizovány včetně barevného a písmenného značení. Ohled byl brán, tak aby charakteristika byla co nejméně nelineární a rozsah a odolnost vůči chemickým vlivům co největší. Na obr. 3.2 jsou zobrazeny charakteristiky některých termočláunků.

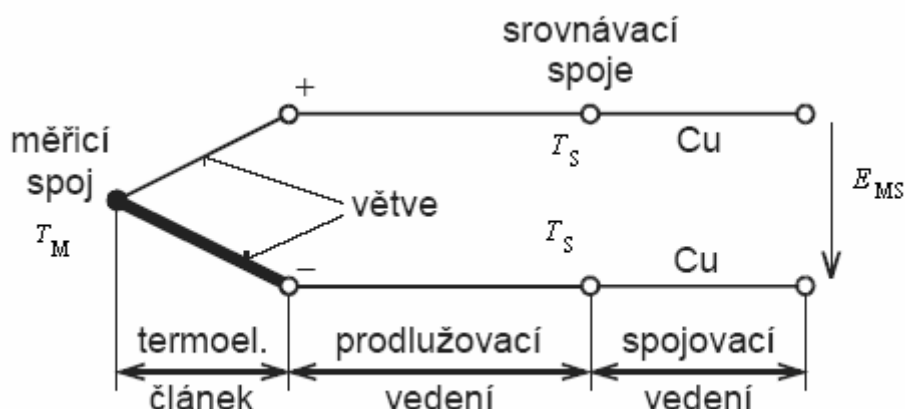


Obrázek 3.2: Statické charakteristiky některých termočláunků [13]

Normalizované páry některých termočláunků

- J Fe-CuNi (železo-konstantan), 0 – 700°C, Fe kladná strana, CuNi záporná, černá.
- K NiCr-NiAl (chromel alumel), -200 – 1200°C, NiCr kladná strana, NiAl záporná, žlutá
- T Cu-CuNi (měď-konstantan), -200 – 350°C, Cu kladná strana, CuNi záporná, oranžová.
- E NiCr-CuNi (chromel-konstantan), -100 – 800°C, NiCr kladná, CuNi záporná, hnědá.
- N NiCrSi-NiSiMg (nicrosil-nisil), -300 – 1300°C, NiCrSi kladná, NiSiMg záporná.

Terminologie a postup při měření



Obrázek 3.3: Zapojení termočlánku [1]

K termoelektrickému článku lze z úsporných hledisek připojit prodlužování vedení, též kompenzační, jenž může být levnější než vodiče termočlánku. Ovšem je třeba dbát na to, aby měli stejné termoelektrické součinitele. Toto vedení se využívá zejména proto, aby se zabránilo vychylování teploty na srovnávacím spoji. Teplota srovnávacího spoje může být totiž ovlivňována např. teplotou měřicího spoje.

Při samotném měření musí být teplota srovnávacího spoje (též vztažná), teplota určená k stanovení velikosti E_{MS} , udržována na konstantní hodnotě. Toho se v praxi dosahuje různými způsoby. První způsob je poměrně nepraktický, ale účinný. Spočívá v tom, že teplota srovnávacího spoje se udržuje na konstantní hodnotě pomocí nádoby s ledovou tříští. Další způsob spočívá v použití termostatu a jiná metoda využívá kompenzační zapojení elektrického obvodu, jenž koriguje teplotní chybu na srovnávacím spoji. To že k termočlánku můžeme bez obav připojit další vodiče nám říká toto pravidlo [1]:

„Termoelektrické napětí nezávisí na vložení dalších vodičů do obvodu termoelektrického článku, ale jen za předpokladu, že konce každého dalšího vodiče mají na spojích stejnou teplotu.“ [1]

Potřebujeme-li zvětšit citlivost termoelektrických článků, můžeme je zapojit do série. Termoelektrické napětí se zvýší tolikrát, kolik jich tam dáme.



3.2 Bezdotykové měření teplot

Přístroje tohoto typu jak je patrné z názvu na měřený objekt nepřikládáme, nýbrž naopak, měříme díky fyzikálním principům z povzdálí.

3.2.1 Základní vztahy a principy

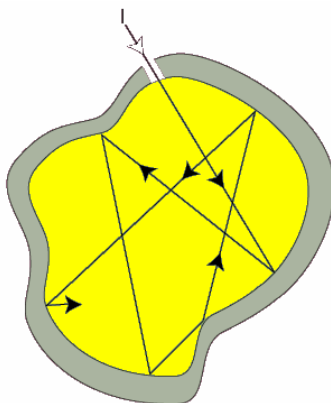
Jak již bylo řečeno, veškerá hmota si vyměňuje mezi sebou teplo elektromagnetickým zářením. Teplejší těleso se ochlazuje a studenější otepluje. Výměna se uskutečňuje tepelnou radiací. Radiace je popsána Planckovou kvantovou teorií. Planck správně předpokládal, že záření se uskutečňuje v kvantech, jež nazval fotony. Ty závisejí na vlnové délce daného záření. Albert Einstein celkovou energii kvanta formuloval vztahem

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad \left[J; Js, Hz; Js, \frac{m}{s}, m \right] \quad (3.2)$$

Kde	E	energie kvanta
	h	je Planckova konstanta, ta se rovná $1,66 \cdot 10^{-27} [Js]$,
	f	je frekvence fotonů,
	c	je rychlost světla, ta se rovná $2,997 \cdot 10^8 [ms^{-1}]$,
	λ	vlnová délka.

Energie kvanta je tedy závislá na vlnové délce. Čím delší je vlnová délka záření, tím menší je energie. Všechny vlnové délky tvoří elektromagnetické spektrum. Tepelná oblast elektromagnetického spektra se nachází v rozmezí $0,1 - 1000 \mu m$. Tento rozsah charakterizuje vlnové délky ultrafialového a infračerveného záření a viditelného světla. Bezdotykové senzory měří v oblasti infračerveného záření $0,78 \mu m - 1000 \mu m$.

Záření, jež dopadá na objekt, je pohlcováno, odráženo, nebo objektem prochází. Pokud objekt vyzařuje záření, tak se ochlazuje. Při absorpci se těleso otepluje. Ke správnému pochopení bezdotykovému měření teplot zavedl Kirchhoff tzv. absolutně černé těleso. Je to těleso, jež dokonale pohlcuje dopadající záření a při zahřátí, dokonale vyzařuje. Na základě těchto vlastností zavedl absorptanci α a emisivitu ε . Obě veličiny mají pro černé těleso hodnotu 1. Absorptance je vlastně podíl pohlceného záření a emisivita je dle [1] poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě. Pro reálné objekty je větší než 0 a menší než 1. Dalšími důležitými pojmy při měření s reálnými objekty jsou emitance, jež popisuje vlastnosti objektu, prostupnost τ a odraznost ρ daných materiálů. Emisivita je vlastně jedna složka z emitance. Emitance totiž závisí ještě na stavu povrchu objektu, teplotě a vlnové délce při které se provádí měření.



Obrázek 3.4: Simulace absolutně černého tělesa pomocí izotermické dutiny [4]

Při měření s reálnými tělesy platí obecně pro každou vlnovou délku

$$\alpha + \tau + \rho = 1. \quad [-] \quad (3.3)$$

Kde α je absorptance,
 τ je prostupnost a
 ρ je odraznost.

To nám říká, že součet záření absorbovaného, odraženého a procházejícího musí být roven celkovému dopadajícímu záření.

Černé těleso má nulovou propustnost a odraznost, proto je emisivita rovna jedné.

3.2.2 Senzory pro bezdotykové měření teploty

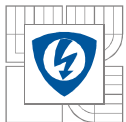
Rozdělují se podle vzájemného působení energetického kvanta a materiálem senzorů na tepelné a kvantové.

Tepelné detektory infračerveného záření

Při pohlcení fotonů se oteplují citlivé části detektorů. U těchto detektorů se nejvíce se využívá termočlávkových baterií a bolometrů.

Termočlávkové baterie

Jsou to termočlávky řazené v sérii z důvodu větší citlivosti. Měřicí spoj bývá začerněn pro větší absorptanci. Tyto baterie jsou zhotovovány z klasických tabelovaných dvojic a dále se také používají termočlávky složené z Bi, Sb... V praxi se dosahuje velice rychlých odezev až 0,04s. Termočlánek se v praxi chová jako černé těleso, takže dopadající fotony absorbuje skoro dokonale, tím se otepluje měrný spoj a výsledná veličina je termoelektrické napětí.



Bolometry

Pracují na stejném principu jako odporové snímače, čili se změnou teploty se mění elektrický odpor. Jsou zhotovovány například z MgO , MnO , NiO atd.. Mají velice malé rozměry, rychlou odezvu a jsou značně citlivé.

Kvantové detektory infračerveného záření

U těchto detektorů dochází při vzájemném působení fotonů a materiálů ke generaci párů elektron-díra a to tehdy, je-li energie fotonů větší než energie zakázaného pásu. Když je tato podmínka splněna, dochází v polovodiči k tepelnému pohybu děr a elektronů, jenž je zcela náhodný. Jsou zhotovovány např. z Ge , Si , InSb .. Tyto senzory se také uplatňují při termovizním snímání.

Fotorezistor

Je to vlastní polovodič (tj. čistý). Při dopadu fotonů na daný materiál dochází k pohyblivosti nosičů nábojů. Je nutné je chladit.

Fotodioda

U tohoto polovodiče se vyskytují příměsi, čili je to nevlastní polovodič. Není nutné je chladit.

3.2.3 Termovizní systémy

Tyto systémy měří teplotní pole bezdotykově. Předchůdce termovize byla a je noktovize, jenž díky fotonásobičům, které zesilují zbytkový tok, umožňuje noční vidění. Termovize přeměňuje tepelné záření na viditelný obraz. Obraz nám ovšem vykresluje v barvách, které neodpovídají skutečnosti. Termovize totiž pracuje v neviditelném radiačním spektru. Barvy si poté sami přidělujeme tzv. barevnými paletami.

Podle rozkladu obrazu se dělí na systémy s optickomechanickým rozkladem obrazu a na systémy s maticovým detektorem. Při opticko mechanickém rozkladu se pohyblivé optické části kamery zaměřují na jednotlivé body měřeného objektu. Tyto systémy se už moc nepoužívají. Nyní se používají maticové kvantové a bolometrické senzory tzv. FPA senzory, jenž jsou chlazené nebo nechlazené. Zpracování je realizováno čipem s multiplexery a A/D převodníky na každém řádku matice. Tyto systémy mají i různé programové vybavení jako barevné palety, vyhodnocování teplot v různých místech objektu, nastavení emisivit atd.

Termovizní systémy se nejvíce používají v infračervené diagnostice, kde se s jejich pomocí zjišťují materiálové vady, opotřebení ale i správná činnost zařízení, či stavy izolátorů. Tyto systémy pracují ve dvou pásmech vlnových délek 2 – 5 μm a 7 – 13 μm .

4 TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE

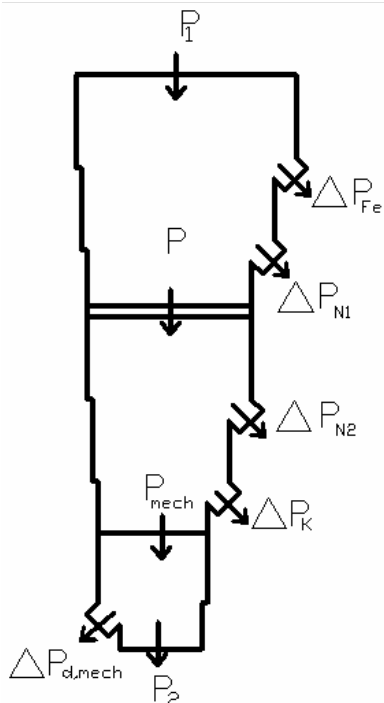
Jelikož se v následujícím měření budeme zabývat teplotní analýzou z hlediska tepelných ztrát a následným odvodem tepla z asynchronních strojů, dělí se tato kapitola na dvě podkapitoly: Ztráty v asynchronním stroji a Odvod tepla z asynchronního stroje.

4.1 Ztráty a oteplení asynchronního stroje

4.1.1 Rozdělení ztrát v asynchronním stroji

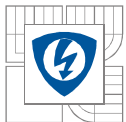
Teplotní pole souvisí s tokem výkonu, ztrátami, čili oteplením a taky s chlazením. Na obrázku č. 4.1 je názorně vidět tok výkonu v asynchronním stroji i jeho ztráty. Dle [5] se u asynchronního stroje se určují tyto ztráty:

1. Jouleovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{N1} [W]
2. Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{N2} [W]
3. Elektrické ztráty v trvale přiložených kartáčích ΔP_K [W]
4. Ztráty v železe (magnetické) rotoru a statoru ΔP_{Fe} [W]
5. Ztráta mechanické (tření) ΔP_{mech} [W]
6. Přídavné ztráty (vířivé proudy; na povrchu; tepavé ztráty) ΔP_d [W]



Obrázek 4.1: Tok výkonu asynchronního motoru

Kde P_1 je příkon [W],
 P_2 je výkon [W],
 P_δ je výkon ve vzduchové mezeře [W].



Ad. 1) a 2) Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty, taktéž elektrické, závisí na průchodu zatěžovacího proudu I , a to sice přímo úměrně jeho druhé mocnině. Dají se určit vztahem

$$\Delta P_N = RI^2 \quad [W; \Omega, A] \quad (4.1)$$

kde R je činný odpor vinutí. Při určování odporu se berou v potaz i ztráty ve vinutí, způsobené vířivými proudy, které vznikají na základě rozptylových magnetických toků, a jejich příčinou jsou ztráty větší. Tyto ztráty se dají zmenšit vhodnou konstrukcí vinutí, v praxi se používá tzv. transpozice. Většinou se se Jouleovy ztráty ve vinutích určují z odporů vinutí.

Ad. 3) Ztráty v kartáčích

Tyto ztráty jsou přímo závislé na průchozím proudu, a jsou dvojího typu. Dělí se na elektrické ztráty ΔP_{jk} a mechanické ΔP_{fk} . Dané kartáče se používají v rotorovém obvodu. Dle [5] elektrické ztráty závisí na proudu a úbytku napětí na kartáčích

$$\Delta P_{jk} = \Delta U_K I_K \quad [W; V, A] \quad (4.2)$$

Kde ΔU_K je úbytek napětí na kartáčích,
 I_K proud kartáče.

Mechanické ztráty závisí dle [5] na tlaku, tření a ploše kartáčů a taky na rychlosti kroužků

$$\Delta P_{fk} = \mu_K p_K S_K v_K \quad [W; -, MPa, m^2, \frac{m}{s}] \quad (4.3)$$

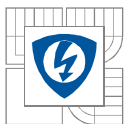
Kde S_K je plocha dotyku kartáče a sběracího kroužku,
 μ_K je činitel tření,
 p_K je přítláčný tlak kartáčů a
 v_K je obvodová rychlost sběracího kroužku.

Ad. 4) Ztráty v železe

Jak již bylo řečeno, tyto ztráty při neměnných otáčkách a napětí prakticky nezávisí na zatěžovacím proudu. Taktéž se dělí na dva typy, a to na ztráty hysterezí P_H a vířivé P_V . Vznikají v plechách magnetického obvodu a nejvíce se tyto ztráty vyskytují ve jhu a zubech. Jejich velikost závisí na typu použité oceli.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_V + \Delta P_H \quad [W] \quad (4.4)$$

V rotoru jsou tyto ztráty zanedbatelné pokud jeho kmitočet není velký. Vyskytují se tedy převážně ve statoru.



Ad. 5) Mechanické ztráty

Opět stejně jako předešlé ztráty nezávisí na zatížení. Pod tyto ztráty se zahrnují i ventilační ztráty, ovšem výpočet je vždy složitý a pouze přibližný. Nejpřesněji se dají určit měřeními na daných strojích. Používá se různých empirických vztahů podle typu stroje. Taktéž lze empirickými vztahy vypočítat samostatně mechanické ztráty v ložiskách, je-li to potřeba.

Ad. 6) Přídavné ztráty.

Taktéž nezávisí na zatížení. Jejich výpočet je velice nesnadný. Podle normy stačí použít vztah

$$\Delta P_d = 0,5\% P_1 \quad [W] \quad (4.5)$$

Kde ΔP_d jsou přídavné ztráty a
 P_1 je příkon.

Tyto ztráty vznikají především díky drážkování, což vede k nerovnoměrnosti vzduchové mezery. Dále se dělí na ztráty povrchové, tepavé a přídavné vířivé. Povrchové ztráty se v praxi určují jen u strojů s velkým výkonem a vznikají díky drážkování. Tepavé ztráty vznikají hlavně díky statorovým a rotorovým zubům a jejich neustále se měnícími polohami, jež mají za následek kmity magnetického toku. Přídavné vířivé úbytky jsou zapříčiněné opět drážkováním, jenž znova způsobuje kmity magnetického pole.

Celkové ztráty ze kterých pak lze určit účinnost dle vztahu (2.26) jsou

$$\Delta P_C = \Delta P_{N1} + \Delta P_{N2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad [W] \quad (4.6)$$

4.1.2 Oteplení asynchronních strojů

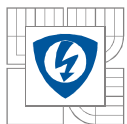
Jak již bylo uvedeno, při zatížení vzniká oteplení v důsledku ztrát. Toto teplo se mezi částmi asynchronního motoru šíří vedením, sáláním či konvekcí. Tyto děje se nevyskytují zvlášť, ale navzájem se ovlivňují a uplatňují se společně. Níže jsou uvedeny jen některé případy těchto dějů.

Přenos tepla vedením se v asynchronním stroji uplatňuje například vedením v hřídeli a v patkách stroje. Přirozená konvekce se vyskytuje u asynchronního stroje s otevřenou ventilací, kdy po doběhu stroje dochází k ventilaci, díky zmíněné přirozené konvekci tak, že vzduch se uvnitř stroje otepluje a jde ven ze stroje směrem nahoru. Nutno podotknout, že u tohoto děje je proudění vesměs laminární. Sálání lze uvažovat u pracujícího asynchronního stroje, jenž stojí daleko od stěn a vyzařuje do okolí určitý tepelný výkon dle vztahu (2.11).

Při umělé konvekci u asynchronního stroje je proudění udáváno do pohybu tlakovým zdrojem, nejčastěji radiální ventilátorem na hřídeli, tak aby překonávalo odpory v kanálech, a tím byla zaručena tepelná výměna. Nejčastěji se vyskytuje proudění turbulentní.

Při návrhu asynchronního stroje a jeho správného přestupu a odvodu tepla se používá stejných zásad jako zmíněných v oddíle (2.2.5 Umělá konvekce).

Při výběru izolačních materiálů je nutné brát v úvahu jak teplotně ustálený stav, v důsledku stálého zatížení, tak stavy při rozběhu stroje kdy rozběhové proudy několikanásobně převyšují proudy jmenovité. V praxi se rozlišuje několik druhů zatížení.



Trvalé zatížení -	Kdy teplota stroje dosáhne ustálených hodnot.
Krátkodobý chod -	Střídá se zatěžování a zastavování stroje, přitom stroj nikdy nedosáhne ustáleného oteplení či vychladnutí.
Přerušovaný chod -	Je téměř stejný jako krátkodobý chod, jen pracovní cykly jsou jiné.

4.2 Odvod tepla z asynchronních strojů

Pro správnou činnost a životnost stroje je návrh chlazení, obzvláště pro nejteplejší části velmi důležitý. Jsou různé způsoby konstrukcí ventilací, jež závisí na druhu krytí a zatížení stroje. Podle směru proudění vzduchu rozeznáváme dle [5] tři způsoby ventilace: radiální, axiální a radiálně axiální.

V elektrických strojích se při oběhu chladicího média vyskytuje převážně proudění turbulentní, jenž je podporováno drsností stěn statoru a rotoru a chvěním stroje. Na výsledné proudění mají také vliv chladicí kanály, a to jak tvar jejich na vstupu a výstupu tak tvar samotného kanálu. Dále je nutno uvažovat, že při rotujícím rotoru se tok chladicího média nahustí na tlačnou stranu, což také podporuje turbulentní proudění. Je samozřejmé, že při ostrých kanálových přechodech se může tok od stěny odtrhnout a mohou tak vznikat vírová pole, ty ale většinou neuvažujeme.

V asynchronních strojích se vyskytuje mnoho možností jak vést chladicí médium. Dle [11] můžeme mít stroj bez radiálních kanálů, stroje s radiálními kanály v rotoru, poté stroje s radiálními kanály ve statoru a také stroje s radiálními kanály v rotoru i statoru. Většinou se posuzuje tvar a typ kanálu a jejich tlakový vliv na tok chladicího média.

4.2.1 Kanály v asynchronních strojích

Kanály slouží k průchodu proudění chladicího média strojem tam, kde je nutno odebrat teplo ze zahřívajících se částí.

Asynchronní stroj bez radiálních kanálů

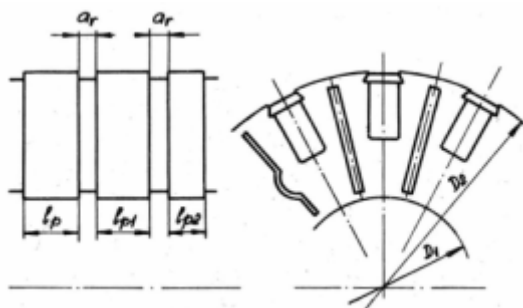
V tomto případě prochází proudění chladicího média paralelními axiálními kanály. Přičemž nejvíce se uplatňují statorové axiální kanály. Vzduchovou mezerou prochází většinou něco okolo 2% z celkového toku. Toto číslo je ještě menší, pokud se ve stroji vyskytují i rotorové axiální kanály. Naopak je tato hodnota větší u větších asynchronních strojů.



Obrázek 4.2: Tok vzduchovou mezerou Q_s paralelní s tokem Q_s ve statorové větvi [5]

Asynchronní stroj s radiálními kanály v rotoru

V dlouhých strojích se rotorový svazek plechů dělí v pakety o délce l_p . Mezi nimi jsou umístěny distanční vložky, jenž jsou k paketům přichyceny různými způsoby. Mezera mezi distančními dvěma vložkami je dělena na dva kanálky klínem a vinutím. Takto vzniklé axiální mezery (kanály) mají šířku dle [chlazení] a_r , o velikosti 0,01; 0,012 nebo 0,015m.



Obrázek 4.3: Radiální ventilační kanály v rotoru [5]

Tyto vzniklé mezery se dají přirovnat k radiálním ventilátorům s rovnými lopatkami, pro které platí vztah (2.20). Přičemž uvažujeme pouze první člen rovnice, pojednávající o statickém tlaku, kde u_1 a u_2 jsou obvodové rychlosti na vstupu a výstupu rotujícího kanálu mezi sousedními distančními vložkami. Přestože je počet lopatek (zde distančních vložek) velký, zanedbáváme druhý člen rovnice, protože kanál je zužován úseky s vinutími a klíny. I třetí člen se zanedbává, i když se někdy část výstupní rychlosti c_2 využije při vstupu do radiálních kanálů ve statoru, ale tento tlakový zisk je velmi nejistý.

Vstup do rotorových radiálních ventilačních kanálů se liší dle konstrukce a velikosti stroje. Může být realizován axiálními kanály v hřídeli, nebo z kanálu mezi žebry na hřídeli a to jednostranně nebo oboustranně. Tento vstup je téměř vždy doprovázen ohybem z axiálního do radiálního směru. Při oboustranné ventilaci jsou toky vstupující do axiálních kanálů ze stran stejné. Polovina radiálních kanálů je napájena z jedné strany a polovina z druhé strany. Výstup proudění z radiálních rotorových kanálků je do vzduchové mezery.

Asynchronní stroj s radiálními kanály v statoru

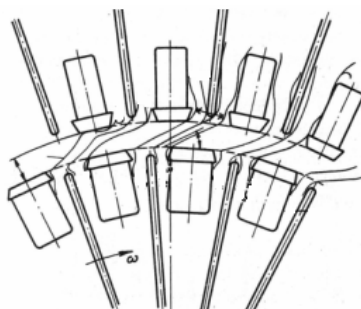
Konstrukce těchto kanálků je podobná jako konstrukce radiálních kanálků v rotorech. Statorový svazek plechů se dělí v pakety, mezi kterými jsou umístěny distanční vložky. Takto vzniklá mezera je ještě dělena na dva kanálky klínem a vinutím. Do těchto dvou kanálků vstupuje dané proudění. Tento vstupní průřez rozdělený na dvě části je nejužší místo celého kanálu. Jelikož se poté kanál rozšiřuje, dal by se uvažovat tlakový difuzorový zisk. Ten záleží na mnoha okolnostech. Kdyby byl úhel β svírající distanční vložka a osa kanálu menší než 5 až 7°, nenastalo by odtržení od stěn, ovšem zde vlivem nepravidelného vstupu hrozí odtržení toku od stěny a vznik vírových polí. Proto se tlakový difuzorový zisk většinou zanedbává.

Vstup do statorových kanálů je velice nejistý, jelikož tok vystupující z rotoru jde vzduchovou mezerou stroje, a poté vstupuje do statorových kanálků. Šířky statorových a rotorových mezer jsou většinou stejné, ovšem jejich počet může být odlišný. Poté nám

nastávají situace, kdy jsou jednotlivé mezery různě přesazené a tok se dělí nepravidelně. Tok vystupující z radiálních statorových kanálů je odváděn axiálními kanály v kostře.

Asynchronní stroje s radiálními kanály v rotoru a statoru.

Souvislosti mezi prouděním vzduchu v těchto typech strojů byly uvažovány v předešlém odstavci. Nutno pouze říct, že mezi stroje, které mají radiální kanály v statoru i rotoru patří větší asynchronní stroje.

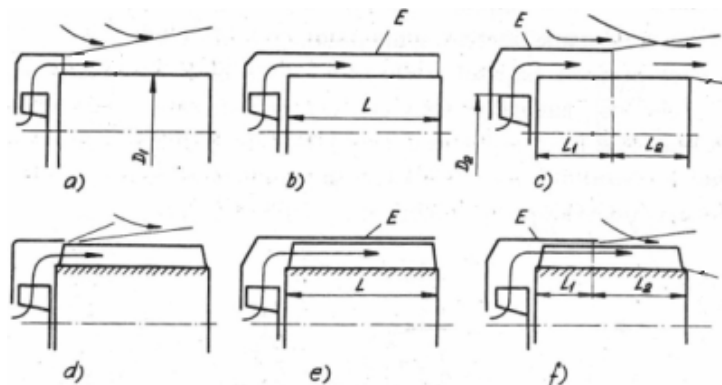


Obrázek 4.4: Přechod toku z radiálního kanálu v rotoru do radiálního kanálu ve statoru [5]

4.2.2 Vnější chladicí okruh uzavřených asynchronních strojů

U těchto strojů je teplo odváděno proudícím médiem z povrchu stroje. Přitom se chladivo trvale obnovuje. Jedná se tedy o otevřený okruh. Zajisté existují případy, kdy je okruh uzavřen a je vybaven chladičem, který předává teplo dalšímu chladicímu okruhu. Vnitřní chladicí okruh se u těchto strojů může a nemusí vyskytovat. Vyskytují-li se u elektrického stroje oba okruhy, tak většinou nebývají na sobě nějak nezávislé.

Ventilátor u tohoto typu chlazení může být jak závislý na energii stroje, tak nezávislý. Je-li ventilátor, zpravidla radiální, umístěn na hřídeli stroje, jedná se většinou o ventilátor závislý. Vzduch se ohýbá z radiálního směru do axiálního, to se v praxi nejčastěji realizuje ventilátorovým krytem E , který nám i poté vede proudění nad kostrou stroje jak je patrné např. z obrázku 4.5 e). Dále můžeme ventilátor umístit samostatně na stroj, či někde vedle něj. Poté je většinou tento ventilátor napájen jiným zdrojem a je na stroji nezávislý.

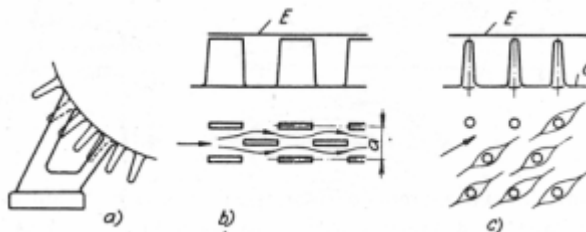


Obrázek 4.5: Vnější chladicí okruh uzavřených strojů, a) b) c) povrch hladký, d) e) f) povrch žebrovaný, a) d) volný povrch b) e) částečně zakrytý, c) f) zakrytý [5]

Nutno podotknout, že vnější chladicí okruh můžeme také dělit podle typu ovívané plochy. Je-li povrch hladký, či žebrovaný a jsou-li tyto dvě možnosti zakryté, nezakryté či částečně zakryté viz. obrázek 4.6. Jak již bylo zmíněno, zakrytí nám lépe vede chladicí tok a zprostředkovává patřičný ohyb toku.

Mezi konstrukční prvky, které umožňují zlepšit tok chladicího média po povrchu při vnějším chlazení patří například:

- Otvory v patkách stroje. Jelikož patky stroje způsobují nepravidelnost proudění po obvodu stroje. Obrázek: 4.6 a).
- Kolíky místo žebrovaného povrchu, protože taktéž dávají chladicímu toku menší odpor. Obrázek: 4.6 c).
- Žebrování štítu nám lépe usměrňuje proudění média. Můžeme mít i krátká přesazená žebra, jenž nám zvyšují turbulenci. Obrázek: 4.6 b).
- Při konstrukci strojů se snažíme zabránit vyčnívání hlav šroubů, matic, nálitků apod. do dráhy toku.



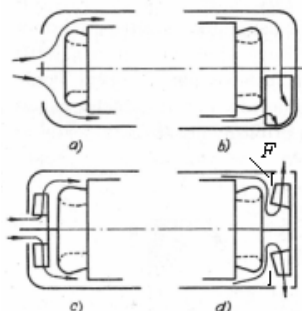
Obrázek 4.6: Úpravy kostry strojů: a) Otvory v patkách b) krátká přesazená žebra c) kolíky [5]

4.2.3 Víka asynchronních strojů

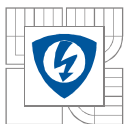
Tímto názvem se souhrnně označují štíty malých a středních asynchronních strojů a vstupní i výstupní kryty velkých strojů. Tok chladicího média je následující: Médium vstupuje vstupním víkem, jde statorových, případně rotorových kanálů a vzduchové mezery a poté vystupuje výstupním víkem do volného prostoru. Víka můžeme dále dělit dle [11] na:

- | | |
|----------------------|-----------------------------------|
| víka bez ventilátoru | - vstupní víka sací ventilace a |
| | - výstupní víka tlačné ventilace |
| víka s ventilátorem | - vstupní víka tlačné ventilace a |
| | - výstupní víka sací ventilace |

Proudění ve víkách je vesměs turbulentní. Při oboustranné ventilaci má motor většinou dvě shodná vstupní víka s ventilátorem.



Obrázek 4.7: Vstupní a výstupní víka, a) vstupní víka u sací ventilace, b) výstupní víka u tlačné ventilace, c) vstupní víko u tlačné ventilace, d) výstupní víko u sací ventilace [5]



Vstupní víka sací ventilace

U těchto typů vík vstupuje proudění axiálními otvory ve víku, poté se ohýbá téměř o 90° , rozšiřuje se a opět se ohýbá o 90° , aby mohlo vstoupit do statorových, případně rotorových kanálů a vzduchové mezery. Po prvním ohybu toku jsou vlastně chlazena čela vinutí a po druhém je odváděno teplo z chladících kanálů. Víka jsou většinou rotačně symetrická, při jakékoliv nesymetrii je tok média složitější.

Výstupní víka tlačné ventilace

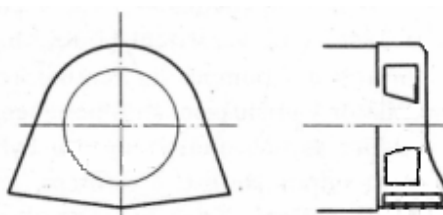
Do výstupního víka tlačné ventilace vstupuje proudění vzduchu z chladících kanálů a vzduchové mezery, zde se tok rozšiřuje a opět dvakrát ohýbá o 90° . Následně vystupuje do volného prostoru. Je zřejmé, že po prvním ohybu opět chladí čela vinutí, a opět zde platí, že pro nesouměrná víka je průběh média složitější.

Vstupní víka tlačné ventilace

Jak je patrné z názvu, je toto víko vybaveno ventilátorem, nejčastěji radiálním s rovnými lopatkami. Průběh proudění je velice podobný jako u vstupního víka bez ventilátoru. V potaz se hlavně bere kolik místa má proudění po výstupu z tlačných stran lopatek ventilátoru na ohyb a vstup do chladících kanálů. Příznivější stav nastává u větších asynchronních strojů, jelikož médium zde má více místa na ohyb a vstup a navíc se zde uplatňuje i difuzorový zisk. Jiný vstup do vík než rotačně symetrický je značně nepříznivý, poněvadž tok poté nevyplňuje rovnoměrně prostor ventilátorových lopatek po celém obvodu a víko je poté většinou vybavováno vodičnými lopatkami či přírodními kanály.

Výstupní víka sací ventilace

Jak je patrné z obrázku 4.7d), proudění vystupuje z chladících kanálů a ohýbá se v rozšířeném prostoru. Opět zde chladí čela vinutí, poté se ohýbá o 180° a vstupuje do ventilátoru. Z ventilátoru vystupuje ohřáté proudění do volného prostředí. Chlazení čel je způsobeno krycí ventilátorovou deskou F která způsobuje ohyb proudícího média do chtěného směru. Nejsou-li tato víka symetrická, ale výstup média je bočními kanály, používají se víka zvonového typu, jelikož lze u nich sestavit větší boční otvory pro vystupující ohřátý chladící tok. Platí totiž, že čím větší část obvodu víka zabírají boční výstupní kanály, tím je odpor víka pro vystupující médium menší.



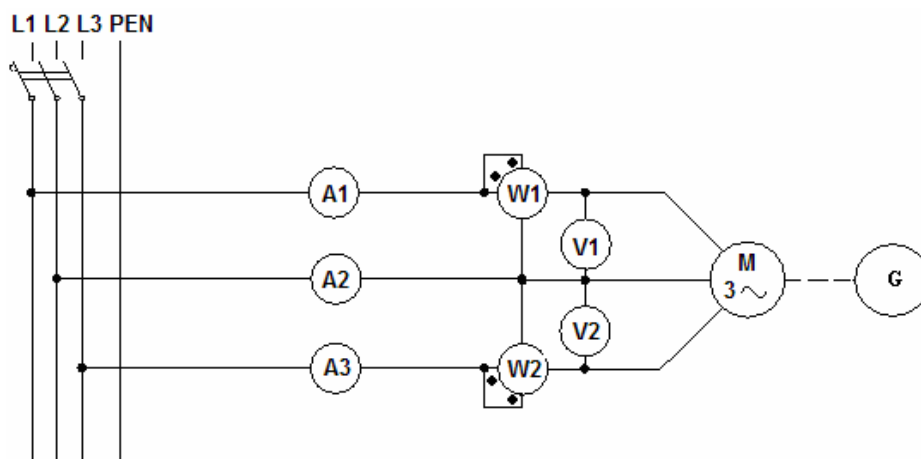
Obrázek 4.8: Zvonové víko [5]

5 MĚŘENÍ

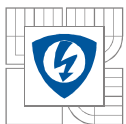
Oteplení asynchronního motoru zatíženého dynamometrem bylo proměřeno pomocí dvou termočlánků (Datalogger), teromokamery a také byl použit anemometr pro měření proudění chladicího média z ventilátorů. Termočlánek číslo jedna byl umístěn vepředu před svorkovnicovou skříní a termočlánek číslo dvě za svorkovnicovou skříní. Asynchronní motor byl uzavřený, žebrovaný a nezakrytý. Jednalo se o vnější závislou ventilaci v podobě radiálního ventilátoru umístěného na hřídeli. Chlazení bylo vzduchem. Pro samotné měření motoru bylo použito Aronovo zapojení, viz. schéma zapojení.

Při prvním měření jsme proměřili zatížený asynchronní motor pouze s touto závislou vnější ventilací pomocí termočlánku a termovize. V následujících dvou měřeních byl zatížený motor doplněn vnějším chladícím okruhem v podobě radiálního ventilátoru. V druhém měření byl ventilátor postaven v ose hřídele, takže chladil vlastně více prostor kolem prvního čidla a ve třetím měření byl ventilátor postaven kolmo na osu hřídele, aby vzduch z ventilátoru proudil kolem svorkové skříně, kde bylo umístěno druhé termočlánekové čidlo. Druhé a třetí měření bylo provedeno jen pomocí termočlánků.

Anemometrem bylo proměřeno proudění způsobené ventilátory, a to jak jeho rychlost, tak teplota. Přitom v_1 a ϑ_1 značí rychlost a teplotu proudění změřenou na vstupu do závislého ventilátoru na hřídeli ventilátoru, v_2 a ϑ_2 rychlost a teplotu proudění na výstupu z motoru. Dále v_3 a ϑ_3 značí rychlost a teplotu proudění vzduchu z vnějšího nezávislého ventilátoru a v_4 a ϑ_4 rychlost a teplotu proudění vzduchu změřenou v ose tohoto ventilátoru ale za motorem.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení



5.1 Změřené hodnoty a grafické závislosti

5.1.1 Měření č.1: Oteplení zatíženého asynchronního stroje bez vnějšího doplňujícího chladícího okruhu

Tabulka č.5.1: Hodnoty z měření č.1: Oteplení zatíženého asynchronního stroje bez vnější nezávislé ventilace

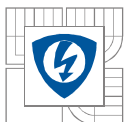
t	θ term.čl.1	θ term.čl.2	t	θ term.čl.1	θ term.čl.2
[min]	[°C]	[°C]	[min]	[°C]	[°C]
0	18,5	18,2	38	56,5	62,1
2	22,0	22,1	40	57,7	63,3
5	26,0	26,5	42	58,5	65,0
8	29,9	30,8	44	59,3	65,9
10	34,3	35,9	46	59,9	67,2
12	36,7	38,1	48	60,5	69,2
14	38,5	41,0	50	61,0	70,3
16	41,4	44,0	52	61,7	71,0
18	42,8	45,9	54	62,1	71,8
20	44,9	48,2	56	62,5	72,2
22	46,3	49,8	58	63,0	73,3
24	47,8	51,8	60	63,4	73,7
26	49,5	53,7	62	63,9	74,3
28	50,7	55,0	64	64,3	74,7
30	52,0	56,7	66	64,7	75,1
32	53,5	58,4	68	64,9	75,2
34	54,5	59,3	70	65,2	75,6
36	55,5	60,7	72	65,3	75,8

Tabulka č.5.2: Změřené hodnoty zatíženého motoru k měření č.1

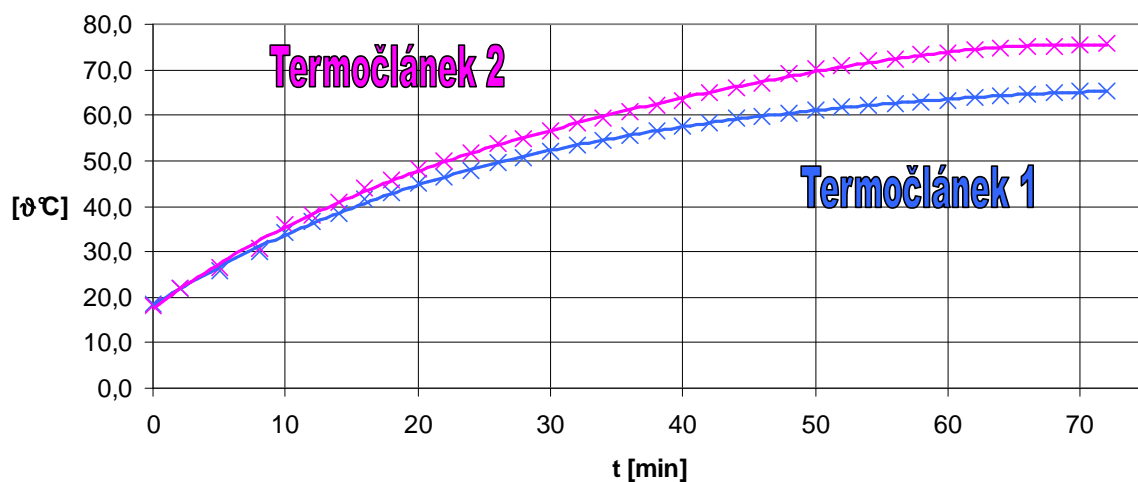
U ₁			U ₂			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	V	α	k	V	α	k	A	α	k	A	α	k	A
150	2	300	150	2	300	4,7	1	4,7	4,85	1	4,85	4,85	1	4,85
P ₁			P ₂			P		n	M					
α	k	W	α	k	W	W		min ⁻¹		Nm				
26	30	780	48	30	1440	960		1357		12,02				

Tabulka č.5.3: Změřené hodnoty ventilátoru anemometrem k měření č.1

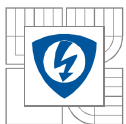
Závislý ventilátor			
v ₁	v ₂	θ ₁	θ ₂
[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[°C]	[°C]
3,13	2,18	19,10	21,10



Oteplení asynchronního motoru při zatížení dynamometrem
 $I_z=4,85\text{A}$



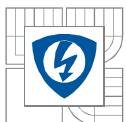
Graf č.5.1: Oteplení asynchronního motoru bez vnější nezávislé ventilace



5.1.2 Měření č.2: Oteplení zatíženého asynchronního stroje s vnějším doplňujícím chladícím ventilátorem v ose hřídele

Tabulka č.5.4: Hodnoty z měření č.3: Oteplení zatíženého asynchronního stroje s vnější nezávislou ventilací

t	θ term.čl.1	θ term.čl.2	t	θ term.čl.1	θ term.čl.2
[min]	[°C]	[°C]	[min]	[°C]	[°C]
0	19,3	18,5	28	44,4	48,5
1	20,4	19,6	29	44,9	49,4
2	22,3	21,6	30	45,3	49,5
3	23,5	23,6	31	45,9	50,1
4	29,6	24,5	32	46,3	50,9
5	26,0	26,4	33	46,9	51,6
6	27,1	27,6	34	47,2	51,8
7	28,4	29,9	35	47,5	52,1
8	29,6	30,7	36	47,9	52,6
9	31,1	32,1	37	48,2	53,2
10	29,8	32,6	38	48,7	53,7
11	30,2	33,5	39	49,2	54,1
12	31,4	34,8	40	49,4	54,4
13	34,0	35,6	41	49,7	54,9
14	34,7	36,4	42	50,0	55,2
15	35,6	37,7	43	50,3	55,6
16	36,3	38,7	44	50,6	55,9
17	37,0	39,7	45	50,8	56,1
18	37,8	40,4	46	51,4	56,6
19	38,5	41,3	47	51,5	56,8
20	39,3	42,6	48	51,8	56,9
21	40,5	43,6	49	52,0	57,4
22	41,2	44,6	50	52,5	57,7
23	41,7	45,3	51	52,5	58,2
24	42,4	46,3	52	52,8	58,5
25	42,9	47,0	53	53,0	58,6
26	43,4	47,3	54	53,3	58,6
27	44,0	48,0	55	53,7	59,1



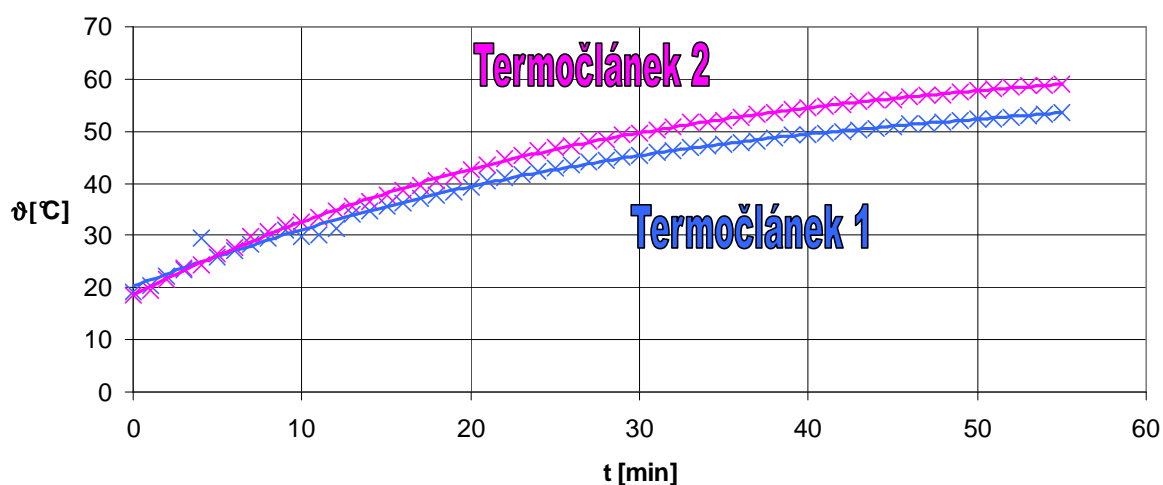
Tabulka č.5.5: Změřené hodnoty zatíženého motoru k měření č.2

U ₁			U ₂			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	V	α	k	V	α	k	A	α	k	A	α	k	A
150	2	300	150	2	300	5	1	5	5	1	5	5	1	5
			P ₁			P ₂			P	n	M			
			α	k	W	α	k	W	W	min ⁻¹	Nm			
			28	30	840	50	30	1500	1920	1300	12,26			

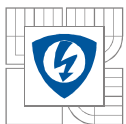
Tabulka č.5.6: Změřené hodnoty ventilátorů anemometrem k měření č.2

Závislý ventilátor				Nezávislý ventilátor			
v ₁	v ₂	θ ₁	θ ₂	v ₃	v ₃	θ ₄	θ ₄
[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[°C]	[°C]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[°C]	[°C]
3,43	2,20	19,20	22,30	3,82	1,43	18,00	18,50

Oteplení asynchronního motoru při zatížení dynamometrem I_z=5A



Graf č.5.2: Oteplení asynchronního motoru s vnějším nezávislým ventilátorem v ose hřídele



5.1.3 Měření č.3: Oteplení zatíženého asynchronního stroje s doplňujícím vnějším chladicím ventilátorem postaveným kolmo k ose hřídele

Tabulka č.5.5: Hodnoty z měření č.3: Oteplení zatíženého asynchronního stroje s vnější nezávislou ventilací

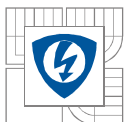
t	θ term.čl.1	θ term.čl.2	t	θ term.čl.1	θ term.čl.2
[min]	[°C]	[°C]	[min]	[°C]	[°C]
0	17,1	17,1	32	50,5	44,3
2	18,6	18,6	34	51,7	46,3
5	21,3	21,4	36	53,4	47,8
8	23,6	24,0	38	55,0	49,0
10	25,5	26,1	40	56,0	49,5
12	27,3	27,6	42	56,8	50,3
14	28,8	29,0	44	57,4	50,8
16	31,6	31,7	46	58,4	51,7
18	34,3	33,5	48	58,7	51,3
20	36,8	35,3	50	59,9	52,8
22	41,2	37,1	52	60,8	54,1
24	43,5	38,9	54	61,2	54,5
26	45,7	40,7	56	61,8	56,4
28	47,5	42,5	58	62,4	57,1
30	49,1	43,0	60	62,9	57,4

Tabulka č.5.8: Změřené hodnoty zatíženého motoru k měření č.3

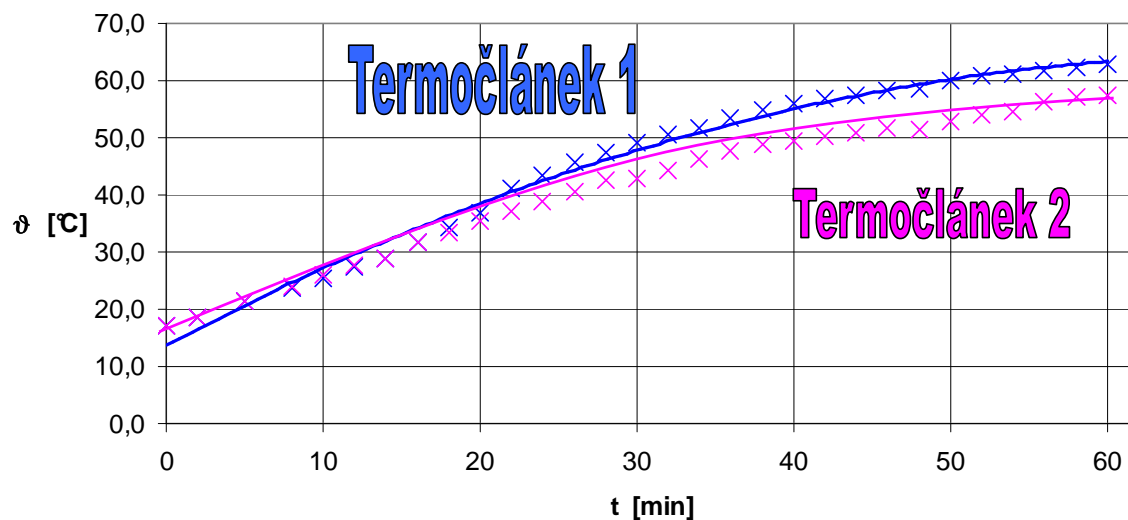
U ₁			U ₂			I ₁			I ₂			I ₃		
α	k	V	α	k	V	α	k	A	α	k	A	α	k	A
150	2	300	300	1	300	5	1	5	5	1	5	5	1	5
P ₁			P ₂			P			n			M		
α	k	W	α	k	W	W			min ⁻¹			Nm		
28	30	840	52	30	1560	1980			1360			12,66		

Tabulka č.5.9: Změřené hodnoty ventilátorů anemometrem k měření č.3

Závislý ventilátor				Nezávislý ventilátor			
V ₁	V ₂	θ ₁	θ ₂	V ₃	V ₃	θ ₄	θ ₄
[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[°C]	[°C]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[°C]	[°C]
3,03	2,21	18,50	20,20	3,57	1,34	18,00	18,70



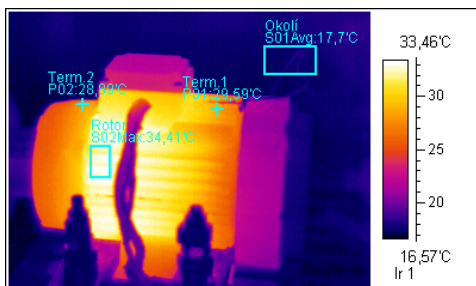
**Oteplení asynchronního motoru při zatížení
dynamometrem $I_z=5A$**



Graf č.5.3: Oteplení asynchronního motoru s vnějším nezávislým ventilátorem postaveným kolmo na osu hřídele

5.2 Měření oteplení asynchronního motoru pomocí termokamery k měření č.1

t = 5min.



Obrázek 5.1: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro t=5min

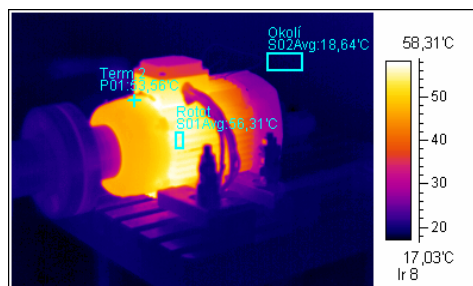


Obrázek 5.5: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro t=15min

t = 25min.

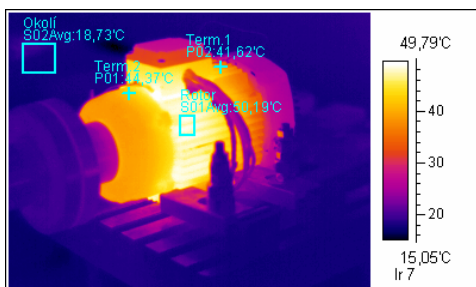


Obrázek 5.3: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro t=5min

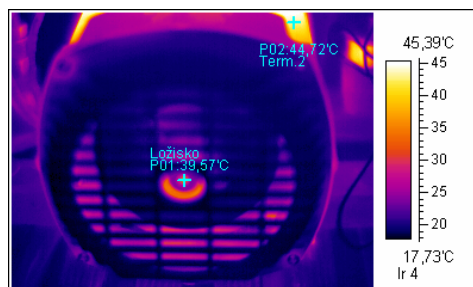


Obrázek 5.6: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro t=25min

t = 15min.

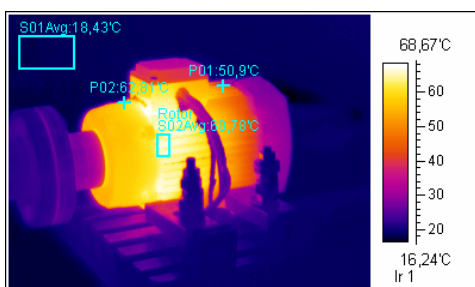


Obrázek 5.4: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro t=15min



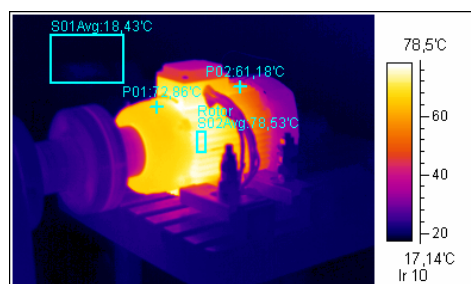
Obrázek 5.7: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro t=25min

t = 35min.

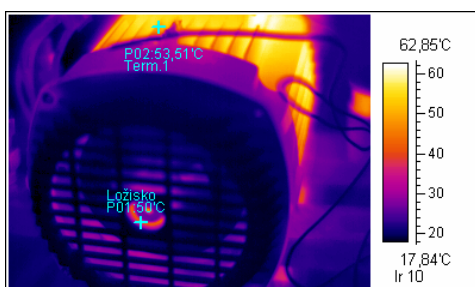


Obrázek 5.8: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=35\text{min}$

t = 55min.



Obrázek 5.12: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=55\text{min}$



Obrázek 5.9: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=35\text{min}$



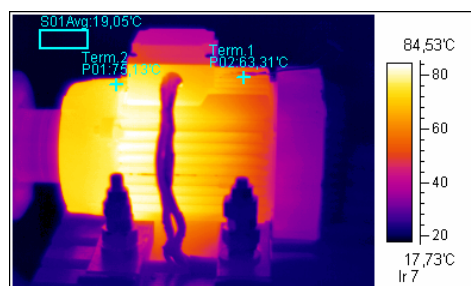
Obrázek 5.13: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=55\text{min}$

t = 45min.

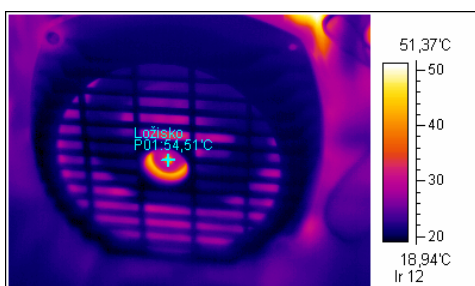


Obrázek 5.10: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=45\text{min}$

t = 65min.



Obrázek 5.14: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=65\text{min}$

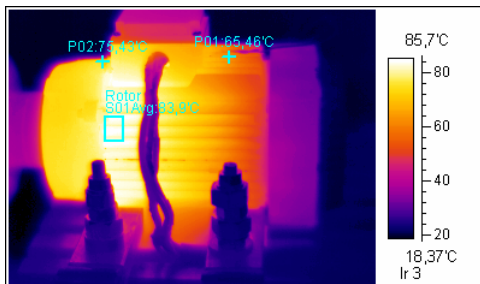


Obrázek 5.11: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=45\text{min}$

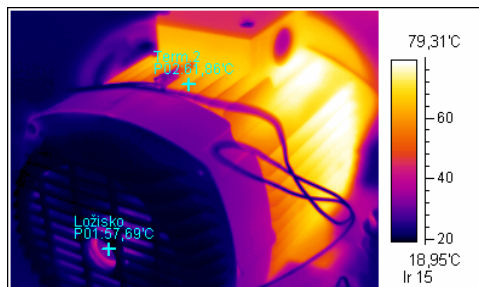


Obrázek 5.15: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=65\text{min}$

t = 70min.

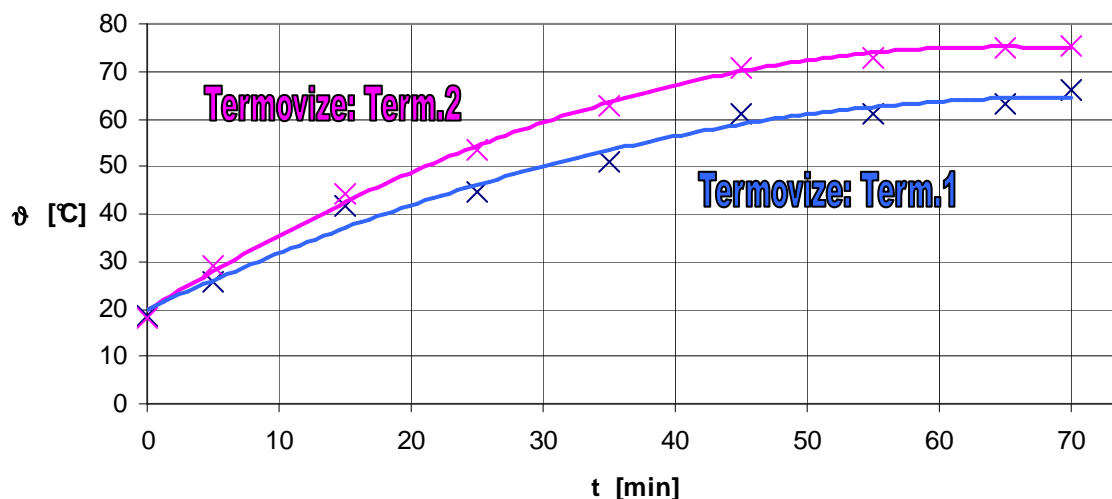


Obrázek 5.16: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=70\text{min}$



Obrázek 5.17: Měření oteplení asynchronního motoru termokamerou pro $t=70\text{min}$

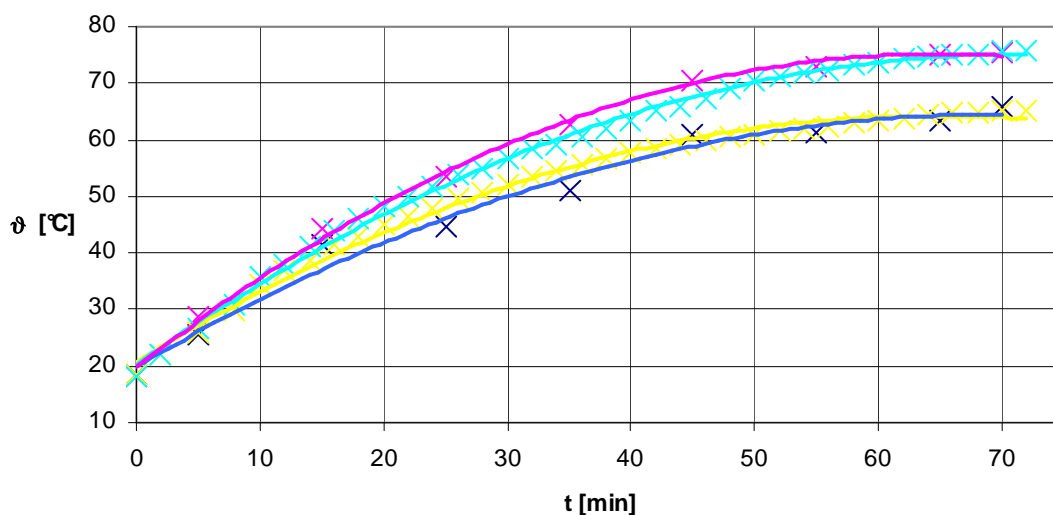
Oteplení zatíženého asynchronního motoru měřeného pomocí termovize



Graf č.5.4: Oteplení asynchronního motoru bez vnější nezávislé ventilace (Měření č.1), měřeno termokamerou

5.3 Porovnání naměřených oteplení

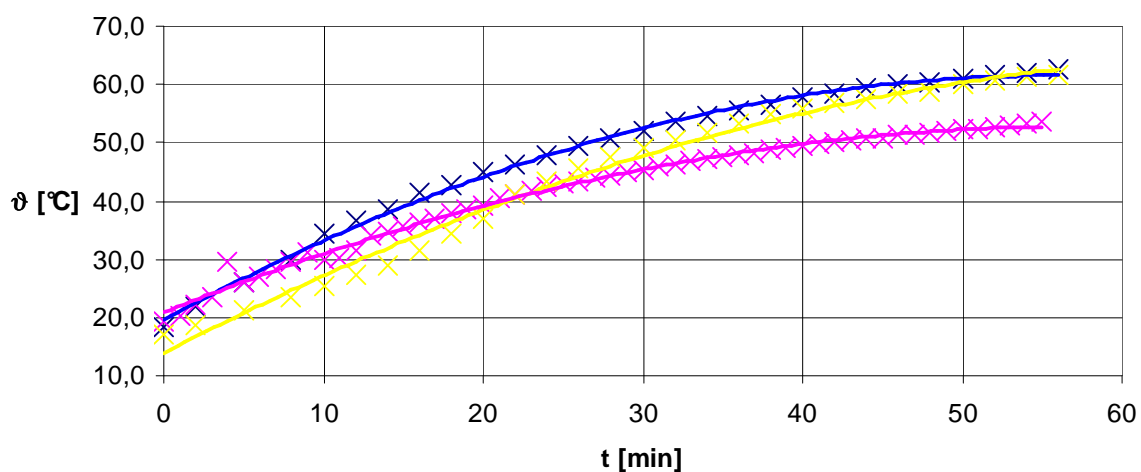
Porovnání hodnot oteplení asynchronního motoru v měření č. 1 měřených termovizí a termočláanky



× Termovize: Term.1 × Termovize: Term.2 × Termočlánek č.1 × Termočlánek č.2

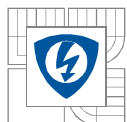
Graf č.5.5: Porovnání naměřených hodnot měřených termočláanky a temokamerou v prvním měření

Porovnání výsledného oteplení motoru naměřených pomocí termočláneků č. 1

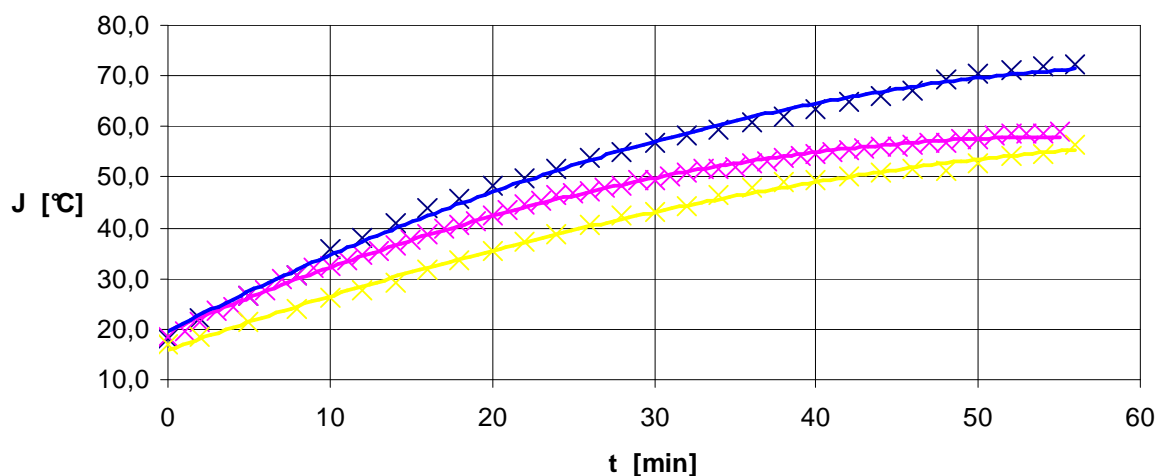


× Měření č. 1 × Měření č. 2 × Měření č. 3

Graf č.5.6: Porovnání jednotlivých oteplení všech tří měření, měřeno termočlánekem č. 1



Porovnání výsledného oteplení motoru naměřených pomocí termočlánků č. 2



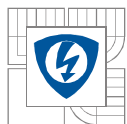
× Měření č. 1 × Měření č. 2 × Měření č. 3

Graf č.5.7: Porovnání jednotlivých oteplení všech tří měření, měřeno termočlánkem č. 2

Použité přístroje

Tabulka č.5.10: Použité přístroje

Označení	Typ	Rozsah	Třída přesnosti	Výrobní číslo	Výrobce
V – voltmetr	analogový	250, 500V	0,5	4174284	METRA
A1 - ampérmetr	analogový	1, 5, 20A	0,5	4173341	METRA
A2 – ampérmetr	analogový	1, 5, 20A	0,5	4173342	METRA
A3 – ampérmetr	analogový	1, 5, 20A	0,5	1150108	METRA
W1 – wattmetr	analogový	120, 240, 360V; 5, 10A	0,5	794226	METRA
W2 – wattmetr	analogový	120, 240, 360V; 5, 10A	0,5	825805	METRA
Otáčkoměr	DMO 907	380		1000023516	JAQUET
M – asynch.motor	TM90-44B3	400/230V; 5,9/8,5A		93 369 718	MEZ Slavkov
D - dynamometr	1KS264			273335	MEZ Vsetín
The Smart Connector Wireless Thermocouple/RTD					
Termokamera					



6 ZÁVĚR

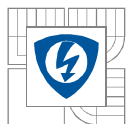
V této bakalářské práci jsme se seznámili s různými způsoby měření teplot na elektrických strojích. V práci jsou nejprve popsány základní tepelné vztahy a způsoby přenosu tepla. Dále jsme se zabývali chlazením elektrických strojů, proto se daná práce zabývá základními pojmy, zákony a způsoby proudění tekutin, a také používanými ventilátory v elektrických strojích. Pro měření teplot jsou v dané práci popsány jak dotykové tak bezdotykové teplotní metody, se kterými jsme v dané práci měřili. U dotykového měření teplot jsou uvedeny termoelektrické články a u bezdotykového měření jsme se věnovali objasnění základních vztahů a principů, a následně je zde popsána termovize. V následném praktickém měření jsme proměřili zatížený asynchronní stroj s vnější ventilací. Z tohoto důvodu je zde popsána analýza ztrát v asynchronním stroji, následný odvod tepla ze stroje a konstrukční prvky, jako jsou chladicí kanály a víka asynchronních strojů.

V daném měření jsme proměřili asynchronní stroj zatížený dynamometrem. Motor byl uzavřený, nezakrytý a žebrovaný s vnější závislou ventilací, v podobě radiálního ventilátoru umístěného na hřídeli, což jsme proměřili v prvním měření pomocí dvou termočlánků a termovize. U tohoto asynchronního motoru se tedy nevyskytovaly žádné chladicí kanály. Termočlánek číslo jedna byl umístěn vepředu před svorkovnicovou skříní a termočlánek číslo dvě za svorkovnicovou skříní. V dalších dvou měřeních jsme jej doplnili o vnější chladicí okruh v podobě nezávislého radiálního ventilátoru a při téměř stejném zatížení jsme jej opětovně proměřili, ale nyní již pouze jen termočlánky umístěnými stejně. Oba chladicí okruhy byly tedy otevřené, odebíraly tedy vzduch z okolí, a poté jej vracely zpět do okolí. Tabulky naměřených hodnot a výsledné grafické závislosti jsou uvedeny výše.

V prvním měření jsme předpokládali vyšší hodnoty ustáleného oteplení v místech přichycení termočlánku číslo dva, jelikož svorkovnicová skříň zhoršuje přestup tepla v daném místě. Taktéž proudění chladicího toku po povrchu stroje musí zajistě překonávat větší odpor daný tvarem kostry v tomto místě. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v oddíle měření 5.1.2. Z grafu číslo 5.1 je patrné, že teploty za svorkovnicovou skříní dosahují v průběhu měření vyšších hodnot než v místech uchycení termočlánku č.1, ke konci měření se liší až o 10°C. Dále byl tento motor, zatížený dynamometrem, proměřen termovizí. Hodnota emisivity byla stanovena na 0,93, což odpovídá, jelikož kostra motoru je natřena černou barvou. Ve vyhodnocených snímcích je pro přehled uvedena teplota rotoru a ložisek. Hodnota oteplení rotoru je v průměru vždy o 10°C větší než oteplení kostry. Taktéž jsou v termovizních snímcích pro přehled vyhodnoceny teploty povrchu v místech kde se nacházely termočlánky. Tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu č. 5.4. Porovnání hodnot oteplení měřených v prvním měření termočlánky a termovizí je v grafu č.5.5. Z grafu je patrné, že výsledné hodnoty se liší jen minimálně. Ustálená hodnota oteplení povrchu v místě uchycení termočlánku č.1 je 60°C a v místě uchycení druhého termočlánku je 70°C.

V měření číslo dva byl zatížený motor doplněn vnějším chladicím okruhem v podobě nezávislého ventilátoru. Daný ventilátor byl umístěn v ose hřídele tak, že proudění vzduchu chladilo vlastně přímo čelo motoru, kde se nacházel termočlánek č.1 a vlivem žebrování i místo uchycení termočlánku č.2. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v oddíle měření 5.1.2. Porovnáním grafů 5.1 a 5.2 je zřejmé, že teploty u tohoto měření jsou pro obě měřená místa vlivem doplňujícího chladicího okruhu menší než v měření číslo jedna. V průměru o 10 °C. Rozdíl teplot naměřených termočlánky číslo jedna a dva je u obou měření téměř stejný. Ustálená oteplení povrchu byla 50 a 60°C.

Ve třetím měření jsme u daného zatíženého asynchronního motoru přemístili vnější nezávislý ventilátor tak, aby chladil přímo místo za svorkovnicovou skříní (kolmo k ose hřídele), kde byl termočlánek č.2. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v oddíle 5.1.3. Porovnáním grafů 5.1 a

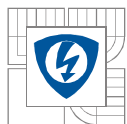


5.3 je zřejmé, že vlivem přemístění ventilátoru kolmo k ose hřídele motoru klesly teploty povrchu v místě za svorkovnicí. Hodnota ustáleného oteplení v místě uchycení termočlánku jedna se opět ustálila okolo 60 °C, stejně jako v měření číslo jedna, kdy nebyla použita doplňková ventilace. Hodnota ustáleného oteplení povrchu za svorkovnicovou skříní se ustálila okolo 58°C.

Výsledné porovnání hodnot oteplení měřených pomocí termočlánků ze všech tří měření se nachází v grafech č. 5.6 a č. 5.7. Z grafů je patrné, že nejefektivnější bylo měření č.2, kde byl doplňkový vnější ventilátor umístěn v ose hřídele. Díky žebrování se dosáhlo zmenšení oteplení jak v místech uchycení termočlánku č.1, tak v místech uchycení termočlánku č.2, a to v průměru o 10 °C. V měření č.3 bylo prouděním chlazeno pouze místo za svorkovnicovou skříní, ale v porovnání s měřením č.2 jsme dosáhli zmenšení oteplení tohoto místa přibližně jen o 3 °C. Hodnota ustáleného oteplení povrchu u druhého měření se pohybovala okolo 55°C.

Dále jsme pomocí anemometru proměřili rychlosti a teploty proudění vzduchu z ventilátorů. Hodnoty jsou uvedeny v tabulkách, v daných oddílech k jednotlivým měřením. V prvním měření bylo proměřeno proudění způsobené závislým radiálním ventilátorem umístěným na hřídeli. Přičemž jak je patrné z tabulky 5.3, rychlost vzduch na výstupu je menší a teplota větší. Což je dáno prostupem proudění vzduchu žebrováním. V následujících měřeních byl anemometrem proměřen jak závislý, tak nezávislý doplňkový ventilátor. Hodnoty rychlosti a teploty se u závislé ventilace téměř nelišily. Jen v druhém měření měl vzduch větší rychlost, jelikož doplňkový ventilátor byl umístěn vepředu (v ose hřídele), přímo naproti vlastnímu závislému ventilátoru. U nezávislého ventilátoru opět rostla teplota a klesala rychlost vzduchu se vzdáleností, kde to bylo měřeno. Nutno podotknout, že tyto naměřené hodnoty jsou vhodné jen pro představu. Pro přesnější hodnoty by bylo nutné udělat více měření.

Dané tři měření proběhla úspěšně, výsledky vycházely dle očekávání. Termočlánek datalogger je velice přesný a jeho čidla mají rychlou odezvu. Jen je nutno si dávat pozor na upevnění termočlánekových čidel. To jsme prováděli pomocí izolační pásky, která se od vyšších teplot začínala uvolňovat. Měření s termokamerou je velice pohodlné, snadné a taky přesné. Míra přesnosti závisí nejvíce na stanovení hodnoty emisivity, jenž se liší pro každý materiál. Proto jsou body, znázorňující termočláneková čidla, na vyhodnocovaných snímcích umístěny vedle čidel. Jelikož daná izolační páska má zajisté jinou hodnotu emisivity než povrch motoru. Nespornou výhodou termokamery zajisté také je to, že můžeme měřit teplotu míst těžko dostupných. Měření anemometrem, jak již bylo zmíněno, je jen pro představu, poněvadž by bylo nutno proměřit proudění vzduchu vícekrát pro přesnější výsledky.



LITERATURA

- [1] Kreidl, Marcel: Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Technická literatura BEN, 2005, 240 s. ISBN 80-7300-145 4.
- [2] Ďaďo, Stanislav , Kreidl, Marcel : *Senzory a měřicí obvody.*: ČVUT, 1996, 315s.
- [3] Lysenko, Vladimír: Detektory pro bezdotykové měření teplot : 1. vydání Praha: BEN-technická literatura, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.
- [4] Soubor technických informací poskytovaných firmou OMEGA: Zpravodaj pro měření a regulaci – Bezdotykové měření teploty: č.1, 2. vydání, 83 s.
- [5] Petrov, G. N.: Elektrické stroje 2. Vydala Academia, Praha 1982, 1. vydání, 732 s.
- [6] Zehnula, Karel, Bejček, Ludvík: Převodníky fyzikálních veličin. Skriptum VUT Brno. Ediční středisko VUT Brno. 92 s.
- [7] Vávra, Zdeněk: Vysoké napětí a elektrické přístroje. Část 2 – Elektrické přístroje. Skriptum VUT, 83 s.
- [8] Elektronický text – Elektrické stroje, 79 s.
- [9] Data Sheet, KTY 83 series, Silicon temperature senzore, Philips Semiconductors 2003, 11 s.
- [10] Data Sheet, NTC Thermistors, Accuracy Line. Vishay BCcomponents, 2008, 24 s.
- [11] Hak, Josef, Ošlejšek, Oldřich: Vypočet chlazení elektrických strojů – 1.Díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Vydání VUES Brno, 1973, 628s.
- [12] Fukátko, Tomáš, Fukátko, Jaroslav: Teplo a chlazení v elektrotechnice: 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2006. 120 s. ISBN 80-7300-199-3.
- [13] Rataj, T.: Měření teploty uvnitř PC. Brno 2008, 65s., 22s. příloh. Diplomová práce na VUT Brno. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Michálek, CSc.
- [14] Wikipedia [Online]. [Citace květen 2009]
Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org>
- [15] Webové stránky společnosti Kovoslužba OTS [Online]. [Citace květen 2009]
Dostupné na WWW: <http://kovosluzbaots.cz/och-ventila.htm>